Министерство образования и науки Российской Федерации

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ

РОССИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 15

Научно-теоретический журнал

Издается с октября 2005 года
Выходит 4 раза в год

ISSN 2074-2762

РГГМУ

Санкт-Петербург
2010

УДК 3 + 502.52 + 55
ББК 6/8 + 26.221 + 26.222 + 26.23

Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета № 15. Научно-теоретический журнал. – СПб.: изд. РГГМУ, 2010. – 247 с.

ISSN 2074-2762

Представлены статьи сотрудников университета и приглашенных специалистов по широкому спектру направлений научной деятельности университета.

Материал сгруппирован по специальностям. Главное внимание уделено проблемам изменения климата, физических процессов в морях, водохозяйственных исследований, экономических механизмов рационального природопользования. В разделе «Хроника» освещены основные события жизни университета.

Предназначен для ученых, исследователей природной среды, экономистов природопользования, аспирантов и студентов, обучающихся по данным специальностям.

Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University. A theoretical research journal. Issue 15. – St. Petersburg: RSHU Publishers, 2010. – 247 pp.

The journal presents research papers of the University associates and invited specialists dealing with a broad range of directions in the scientific activities of the University.

The material is grouped according to areas of research. Much attention is given to problems of climate change, physical processes in the seas, water management studies, economic mechanisms of rational nature management. Section “Chronicle” highlights major events in the University’s life.

The journal is intended for scientists studying the environment, specialists in economics of nature management, PhD students and undergraduates specializing in these fields of knowledge.

Редакционная коллегия:
Главный редактор: Л.Н. Карлин, д-р физ.-мат. наук, проф.
Зам. главного редактора: В.Н. Воробьев, канд. геогр. наук.
Члены редколлегии: А.М. Владимиров, д-р геогр. наук, проф., Л.П. Бескид, д-р техн. наук, проф., В.Н. Малинин, д-р геогр. наук, проф., И.Г. Максимова, отв. секретарь, Н.П. Смирнов, д-р геогр. наук, проф., А.И. Угрюмов, д-р геогр. наук, проф., И.П. Фирова, д-р эконом. наук, проф.

ISSN 2074-2762

Журнал включен в Перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, в которых должны быть опубликованы основные результаты диссертаций на соискание ученой степени доктора и кандидата наук.

Журнал зарегистрирован в Управлении Федеральной службы по надзору за соблюдением законодательства в сфере массовых коммуникаций и охране культурного наследия по Северо-Западному Федеральному округу.

Свидетельство ПИ № ФС2-8484 от 7.02.2007 г.

Специализация: метеорология, гидрология, океанология, геоэкология, геофизика, общественные и гуманитарные науки.

Подписной индекс 78576 в каталоге «Каталог российской прессы «Почта России».

Журнал включен в базу данных «Российский индекс научного цитирования» (РИНЦ), размещенную на платформе Национальной электронной библиотеки http://elibrary.ru

При перепечатке материалов ссылка на журнал обязательна.

Точка зрения редакции может не совпадать с мнением авторов статей.

Адрес редакции: Россия, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.
Тел.: (812) 444-81-55

© Российский государственный гидрометеорологический университет (РГГМУ), 2010

© Авторы публикаций, 2010

СОДЕРЖАНИЕ

Гидрология

В.В. Коваленко. Выбросы размерности фазовых пространств прогностических и диагностических моделей развития процессов катастрофического формирования многолетнего речного стока 5

Т.В. Векшина. Гидравлические сопротивления русел рек, зарастающих растительностью 19

Н.Б. Барышников, Е.С. Субботина. Учёт особенностей морфологического строения расчётного участка при определении пропускной способности русел с поймами 27

Метеорология

И.Н. Русин. Влияние на расчет инсоляции погрешностей определения положения Солнца 33

А.Е. Шадурский, В.А. Лобанов. Оценка региональных климатических изменений на севере Западной Сибири 44

Аль-Бухайри Осама Ахмед, Н.П. Смирнов. Сезонные и многолетние изменения температуры воздуха в республике Йемен и южной части Аравийского полуострова в XX и начале XXI века 50

Е.М. Атласкин. Исследование чувствительности гидродинамической модели прогноза погоды к изменению функций стратификации в блоке параметризации турбулентности 64

А.М. Кокорин. Модификация решения задачи рассеяния света на двухслойной просветленной сфере и его применение в задачах атмосферной оптики 77

В.Я. Александров, А.Я. Коржиков. Колебания среднегодовых аномалий температуры воздуха на Антарктическом полуострове в связи с особенностями атмосферных процессов в Южной Полярной области 86

А.П. Филиппенко, С.П. Смышляев, П.А. Блакитная. Химические механизмы трансформации токсичных газов в атмосфере 92

Ю.В. Гаврилова, С.П. Смышляев, А.Г. Махура. Модельное исследование влияния крупных городов на региональные аспекты погоды 107

Океанология

Н.П. Смирнов, В.Н. Воробьев, В.В. Дроздов. Циклонический центр действия атмосферы и океана в Северной Атлантике 117

В.Д. Бойцов, А.Л. Карсаков, А.А. Аверкиев, Д.В. Густоев, И.П. Карпова. Исследование изменчивости гидрофизических характеристик по наблюдениям на разрезе «Кольский меридиан» 135

В.Н. Малинин, О.И. Шевчук. Об изменениях глобального климата в начале 21-го столетия 150

Экология

В.В. Дроздов. Особенности многолетней динамики экосистемы Азовского моря под влиянием климатических и антропогенных факторов 155

Л.Н. Карлин, А.В. Дикинис, В.Б.Сапунов. Критерии экологической нагрузки 177

Геофизика

М.Ю. Белевич. Групповой анализ моделей жидкости 190

Социально-гуманитарные науки

П.П. Бескид, Т.М. Татарникова. О некоторых подходах к решению проблемы авторского права в сети Интернет 199

Н.М. Боголюбова. Проблемы международного экологического сотрудничества во внешней культурной политике России 211

Ю.В. Николаева. Проблемы экологии во внешней и внутренней политике Франции 219

М.Г. Лазар. Социальный институт науки как предмет социологии и науковедения 229

Хроника 241

Список авторов 244

Требования к представлению и оформлению рукописей для авторов журнала 245

CONTENTS

Hydrology

V.V. Kovalenko. Emissions of dimension of phase spaces of forecast and diagnostic models of development of processes of catastrophic formation of a long-term river flow 5
T.V. Vekshina. Hydraulic resistance of river channels growing over with vegetation 19
N.B. Baryshnikov, E.S. Subbotina. Determination of the floodplain river channels discharge capacity based on morphological patterns of the considered river section 27

Meteorology

I.N. Rusin. Impact on the calculation insolation errors in determining the position of the Sun . . . 33
A.E. Shadursky, V.A. Lobanov. Assessment of regional climate change in Northern West Siberia . . 44
Al-Buhairi Osama Ahmed, N.P. Smirnov. Seasonal and long-term changes of temperature in the Republic of Yemen and the Southern Arabia XX–XXI century 50
E.M. Atlaskin. Sensitivity study of a numerical weather prediction model to modifications of stability functions in turbulence parametrization scheme 64
A.M. Kokorin. The modified decision of a problem of dispersion of light on the two-layer antireflection sphere and its application in problems of atmospheric optics 77
V.Ya. Alexandrov, A.Ya. Korjikov. Fluctuations of mid-annual anomalies of temperature of air on antarctic peninsula IN connection with features of atmospheric Processes in Southern Polar area 86
A.P. Filippenko, S.P. Smyshlyaev, P.A. Blakitnaya. Mechanisms of toxic gases transformation in the atmosphere 92
Y.V. Gavrilova, S.P. Smyshlyaev, A.G. Mahura. A model study of the megacities effects to the regional aspects of weather 107

Oceanology

N.P. Smirnov, V.N. Vorobyov, V.V. Drozdov. Cyclonic center of atmosphere and ocean action in North Atlantic 117
V.D. Boitsov, A.L. Karsakov, A.S. Averkiev, D.V. Gustoev, I.P. Karpova. Research of variability hydrophysical charakteristik on the «The Kola meridian» cross-section observations 135
V.N. Malinin, O.I. Shevchuk. On changing of the global climate in the early 21st century 150

Ecology

V.V. Drozdov. Features of long-term dynamics of an ecosystem of sea of Azov under the influence of climatic and anthropogenous factors 155
L.N. Karlin , A.V.Dikinis, V.B.Sapunov. Criteria of ecological stress 177

Geophizica

M.Yu. Belevich. Group analysis of the fluid models 190

Social science and humanities

P.P. Beskid, T.M. Tatarnikova. About some approaches to the copyright solution of a problem in the Internet 199
N.M. Bogoliubova. Problems of the international ecological cooperation in external cultural politicians of Russia 211
J.V. Nikolaeva. Ecology problems in domestic and foreign policy of France 219
M.G. Lazar. Social and institutional status of science as the subject of sociology and science of science 229

Chronicle 241

ГИДРОЛОГИЯ

В.В. Коваленко

ВЫБРОСЫ РАЗМЕРНОСТИ ФАЗОВЫХ ПРОСТРАНСТВ ПРОГНОСТИЧЕСКИХ И ДИАГНОСТИЧЕСКИХ МОДЕЛЕЙ РАЗВИТИЯ ПРОЦЕССОВ КАТАСТРОФИЧЕСКОГО ФОРМИРОВАНИЯ МНОГОЛЕТНЕГО РЕЧНОГО СТОКА

V.V. Kovalenko

EMISSIONS OF DIMENSION OF PHASE SPACES OF FORECAST AND DIAGNOSTIC MODELS OF DEVELOPMENT OF PROCESSES OF CATASTROPHIC FORMATION OF A LONG-TERM RIVER FLOW

Введено новое для гидрологии понятие «выброс размерности» фазового пространства моделей формирования стока. Гносеологически, учет новых фазовых переменных обеспечивает статистическую устойчивость прогнозирования стоковых характеристик. Выявлено географическое распределение на ЕТР зон с неустойчивым формированием стока и испарения при использовании модели линейного формирующего фильтра, приводящей к одномодальным распределениям К. Пирсона. С помощью двумерного логистического отображения дано теоретическое обоснование механизма рассматриваемых выбросов в зонах неустойчивости.

Ключевые слова: многолетний речной сток, фазовая размерность, неустойчивость статистических моментов, выбросы размерности фазовых пространств.

The concept, new to a hydrology, «emission of dimension» of phase space of models of formation of a flow is entered. The account new phase variable provides statistical stability of forecasting of the flow characteristics. The geographical distribution on the European territory of Russia of zones with unstable formation of a flow and evaporation is revealed at use of model of the linear forming filter resulting in one-modal distributions of Pirson. With the help of two-dimensional logistic display the theoretical substantiation of the mechanism of considered emissions in zones of instability is given.

Key words: long-term river flow, phase dimension, instability of the statistical moments, emissions of dimension of phase spaces.

Введение

Обычно слово «катастрофа» ассоциируется с чисто бытовым взглядом на ситуацию: повышается уровень воды в реке, затопляются населенные пункты и т. п. С точки же зрения статистической гидрологии за этим явлением (бытовой

катастрофой) может и не быть катастрофы в более строгом научном понимании этого термина. Если имеются ряды многолетних наблюдений, которые вполне приемлемо (на требуемом уровне статистической значимости) описываются устойчивыми распределениями и происходящие события (наводнения) вполне укладываются (по повторяемости и высоте стояния уровня малой обеспеченности) в имеющиеся статистические описания, то в этих наводнениях нет никакой непредсказуемости. Они статистически предсказуемы (например, раз в 10 лет). Хотя мы подчас не можем указать конкретную траекторию случайного процесса изменения расхода воды Q (его ординату и дату наступления нежелательного явления), но статистически не происходит ничего необычного. Решая задачу о выбросах ординат случайного процесса за критический уровень обеспеченности, можно найти частоту и продолжительность подобных выбросов, т.е. дать практически полное статистическое описание случайного процесса [Румянцев, 1985]. Проблемы начинаются, если имеющейся ряд наблюдений не дает статистически устойчивого описания процесса. Обычно используют одномодальные асимметричные распределения плотности вероятности p (например из семейства кривых Пирсона или их модификации Крицкого–Менкеля). Однако в реальности эмпирические кривые могут и не соответствовать такой идеализации. Если процесс формирования стока неустойчив (имеется в виду физическая неустойчивость [Коваленко, 2008], а не неустойчивость моментов из-за недостаточной продолжительности наблюдений), «хвосты» распределений меняются не по экспоненте ($p \sim \exp(-Q^2) \underset{Q\to\infty}{\to} 0$), а по степенному закону ($p \sim \mathrm{const}/Q^{(1+\alpha)} \not\to 0$ при $0 \le \alpha \le 1$). Довольно часто (в южных регионах России) на гистограммах наблюдаются вторые (а то и третьи) моды, которые естественно поднимают хвост аппроксимирующих одномодальных распределений, делая их неустойчивыми по дисперсии.

Именно такие неустойчивости в статье интерпретируются как катастрофы. Естественно, они также приводят к бытовым бедствиям, но дело еще усугубляется и тем, что это еще и катастрофы статистические – невозможность статистически устойчивого (как в предыдущем случае) описания процесса. Цель статьи – предложить методику диагностирования появления таких неустойчивостей, а также прогностические модели развития процессов катастрофического формирования многолетнего стока.

Мотивация и постановка задачи исследования

Диагностировать появление статистической неустойчивости или прогнозировать эволюцию вероятностных распределений, опираясь только на существующие ряды наблюдений невозможно. По фактическим рядам можно, например, констатировать факт неоднородности (связанный, возможно, с возникшей за период наблюдений неустойчивостью), но нельзя ее прогнозировать или диагностировать исходя из факторов формирования стока (нужна математическая

модель, куда эти факторы входят и при определенном сочетании вызывают неустойчивость решения модели).

На рис. 1 представлены варианты возможных изменений гидрологических процессов. Обычно прогнозы (сценарные оценки) гидрологических последствий изменения климата предполагают переход от одной равновесной ситуации (ряд *0* на интервале ОА) к другой такой же равновесной (ряд *3* на интервале БВ). Но кто доказал, что климатическая система, выведенная из равновесия, должна снова быстро стабилизироваться? Учитывая, что она содержит такие инерционные составляющие, как океан, надеяться на это не приходится. Ситуация может, например, развиваться в соответствии с процессом *4* на интервале БВ (или что-то в подобном духе).

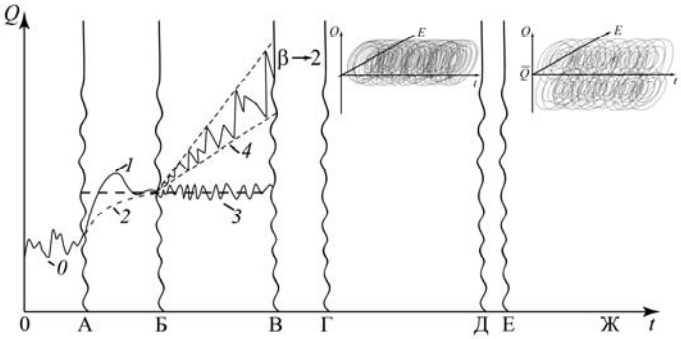


Рис. 1. Некоторые варианты изменения гидрологических процессов: ОА – стационарный ряд *0*; АБ – переходные режимы (*1* – колебательный, *2* – апериодический); БВ – режимы в новом климате (*3* – при равновесном сценарии, *4* – неустановившийся режим); ВГ – зарождение второй фазовой переменной; ГД – двухфазный режим; ДЕ – зарождение второй «моды» в двухфазном режиме; ЕЖ – двухфазный «двухмодальный» случайный процесс (реализация)

Важно обратить внимание на то, что обычно сценарные задачи, связанные с изменением климата, игнорируют переходные режимы (интервал АБ), которые могут быть как апериодическими (*2*), так и колебательными (*1*); по крайней мере, этот вопрос не изучался.

Наличие трендов (ряд *4* на интервале БВ) может привести к росту параметра устойчивости β (о нем – ниже) на интервале ВГ и к появлению статистически значимой второй фазовой переменной (например, испарения *E*, интервал ГД). Возможно дальнейшее усложнение процесса, например появление второго центра притяжения–отталкивания (второй «моды», интервал ЕЖ), а также другие варианты, включая регрессивные упрощения.

Таким образом, могут происходить не только выбросы ординат случайного процесса за критический уровень обеспеченности; эволюционировать могут сами моменты распределений, а «выбросы» может иметь и размерность фазового пространства.

Если опираться на обычные одномодальные асимметричные кривые распределения используемые в инженерной гидрологии, то прогностической моде-

лью, работоспособной на интервале ОВ может служить линейный формирующий фильтр

$$dQ = [-(\bar{c} + \tilde{c})Q + \bar{N} + \tilde{N}]dt, \qquad (1)$$

где $c = \bar{c} + \tilde{c} = 1/k\tau$; $N = \bar{N} + \tilde{N} = \dot{X}/\tau$ (здесь k – коэффициент стока, τ – время релаксации бассейна, $\dot{X}$ – осадки; $\bar{N}$, $\bar{c}$ – статистические нормы; $\tilde{N}$, $\tilde{c}$ – коррелированные белые шумы с интенсивностями $G_{\tilde{N}}$, $G_{\tilde{c}}$ и взаимной интенсивностью $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$).

Уравнение (1) статистически эквивалентно уравнению Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК), которое и является прогностической моделью для эволюции плотности вероятности $p(Q)$:

$$\frac{\partial p(Q,t)}{\partial t} = -\frac{\partial\big(A(Q,t)p(Q,t)\big)}{\partial Q} + 0{,}5\frac{\partial^2\big(B(Q,t)p(Q,t)\big)}{\partial Q^2}, \qquad (2)$$

где A, B – коэффициенты сноса и диффузии, определяемые физико-географическими параметрами, входящими в (1).

Заметим, что на практике ограничиваются (из-за коротких рядов наблюдений) несколькими начальными моментами m_i. Поэтому аппроксимируем уравнение ФПК для $p(Q)$ системой уравнений для моментов. В теории случайных процессов подобная процедура известна, и в нашем случае она приводит к следующей системе дифференциальных уравнений для моментов:

$$\begin{aligned}
dm_1/dt &= \big(\bar{c} - 0{,}5G_{\tilde{c}}\big)m_1 - 0{,}5G_{\tilde{c}\tilde{N}} + \bar{N};\\
dm_2/dt &= -2\big(\bar{c} - G_{\tilde{c}}\big)m_2 + 2\bar{N}m_1 - 3G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_1 + G_{\tilde{N}};\\
dm_3/dt &= -3\big(\bar{c} - 1{,}5G_{\tilde{c}}\big)m_3 + 3\bar{N}m_2 - 7{,}5G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_2 + 3G_{\tilde{N}}m_1;\\
dm_4/dt &= -4\big(\bar{c} - 2G_{\tilde{c}}\big)m_4 + 4\bar{N}m_3 - 14G_{\tilde{c}\tilde{N}}m_3 + 6G_{\tilde{N}}m_2.
\end{aligned} \qquad (3)$$

Предполагается, что решение системы (3) устойчиво, т. е. $\operatorname{div} m_i = \sum_{i=1}^{4} d\dot{m}_i/dm_i < 0$ $\big(\bar{c} > 2G_{\tilde{c}}\big)$. С помощью подобной модели (ее можно упростить, отбросив последнее уравнение, так как эксцесс, для вычисления которого нужен четвертый момент, в практической гидрологии не используется) можно решать задачи на любом из интервалов участка ОВ (рис. 1).

«Стационарный интервал» ОА, на котором $dm_i/dt = 0$, можно использовать для идентификации параметров $G_{\tilde{c}}, G_{\tilde{c}\tilde{N}}, \bar{c}$ ($\bar{N}$ и $G_{\tilde{N}}$ – задаваемые внешние воздействия при фактическом или «сценарном» климате). На интервале БВ

вычисляется изменение моментов [а значит, и эволюция плотности вероятности $p(Q)$] при неравновесном (кривая *4*) или равновесном (кривая *3*) климате.

Основное допущение, которое на сегодняшний день приходится делать, заключается в «замораживании» интенсивности шумов: $G_{\tilde{c}}^{\text{ОА}} = G_{\tilde{c}}^{\text{БВ}}$, $G_{\tilde{c}\tilde{N}}^{\text{ОА}} = G_{\tilde{c}\tilde{N}}^{\text{БВ}}$ (каких-либо попыток их размораживания автору неизвестно). Однако и при этом допущении (как показали расчеты на ретроспективном материале) по большинству статистических критериев согласия в 70–80 % случаев результаты оказываются удовлетворительными на приемлемом уровне значимости (см. [Коваленко, 2006]).

Модель, представленная системой (3), является одновременно и диагностической так как позволяет выявлять условия, при которых происходит потеря устойчивости входящих в нее начальных моментов. Из уравнений видно, что при $\bar{c} < 0{,}5iG_{\tilde{c}}$ (здесь i – порядок момента) $dm_i / dt > 0$, т. е. $m_i \to \infty$. Это и есть формальный признак неустойчивости. Если обозначить $\beta = G_{\tilde{c}} / \bar{c}$, то неустойчивость для момента i-го порядка возникает при $\beta > 2/i$ (чем старше момент, тем меньшая относительная интенсивность шума $G_{\tilde{c}} / \bar{c}$ требуется для неустойчивости; по старшим моментам речной сток практически всегда неустойчив). Ранее [Коваленко, 1998] была получена (как следствие одного из решений уравнения ФПК) сравнительно простая диагностическая модель для вычисления β:

$$\beta = 2k \ln r + 2, \tag{4}$$

где k – коэффициент стока; r – коэффициент автокорреляции стока смежных лет.

По этой формуле были диагностированы зоны неустойчивости по трем начальным моментам территории России (см. ниже).

Таким образом, на сегодняшний день есть апробированная модель для прогнозирования вероятностных устойчивых распределений, которая одновременно диагностирует статистическую неустойчивость, приводящую к катастрофам в том смысле, который изложен во введении, а именно к невозможности описывать редкие катастрофические явления даже в статистическом смысле. Неустойчивость указывает, по крайней мере, на то, что не срабатывает линейный формирующий фильтр (1), на основе которого построена («молчаливо» и в большинстве случаев без понимания этого факта) практически вся инженерная гидрология, кодифицированная в нормативном документе [СП 33-101-2003]. Неустойчивость указывает на невозможность оперировать одной фазовой переменной – расходом воды. Необходимо менять размерность модели, с помощью которой описывается (прогнозируется) формирование гидрологического режима бассейна.

Под «выбросами размерности» мы понимаем появление (или исчезновение) новых фазовых переменных, которые в совокупности со старыми фазовыми пе-

ременными устойчиво описывают процесс эволюции (деградации) рассматриваемой системы. На рис. 1 это соответствует переходу от интервала БВ к интервалу ГД. Для развивающихся систем подобная эволюция происходит через потерю устойчивости «старой» системы (интервал ВГ).

Этот же процесс можно изобразить еще нагляднее (рис. 2). На интервале (*1*) «проволока» расположена в плоскости (*xt*). Затем появляется новое измерение (*y*) и на интервале (*2*) «проволока» закручивается в пружину, «осваивая» пространство (*xyt*). На интервале (*3*) «проволока» снова занимает плоскость, но уже другую (*yt*). Для освоения новых фазовых переменных системе нужны ресурсы, и она их получает из инфинитного окружения (эта терминология из частично инфинитной гидрологии [Коваленко, 2007; 2009]).

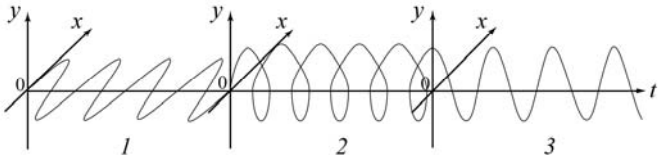


Рис. 2. Переход от плоскости (*1*) к пространству (*2*) и снова к плоскости (*3*)

На длительном интервале своего развития гидрологические системы могут неоднократно менять размерность своего фазового пространства, которая не ограничивается тремя, как в примере с «проволокой», в котором имелось в виду геометрическое пространство. По существу, частично инфинитная гидрология была создана для того, чтобы в какой-то мере рационализировать механизм расширения фазовых пространств, что на более спокойном «жаргоне» интерпретируется как процесс развития.

Механизм выбросов в рамках корреляционного анализа

Проиллюстрируем особенности этого механизма на простом и наглядном примере в рамках корреляционного анализа систем с параметрическими шумами.

В частично инфинитной гидрологии (да и вообще в нелинейной динамике) считается возможным (а с практической точки зрения – необходимым) аппроксимировать бесконечномерные модели конечномерными в виде систем обыкновенных дифференциальных уравнений [например, (3)]. В достаточно общем случае подобная система имеет вид:

$$dY_i = \left(\sum_{j=1}^{n}\left(\bar{c}_{ij} + \tilde{c}_{ij}\right)\varphi_{ij}\left(\vec{Y}\right) + \bar{N}_i + \tilde{N}_i\right)dt \quad \left(i, j = \overline{1, n}\right), \tag{5}$$

где $\vec{Y}$ – вектор состояния системы («набор» фазовых переменных, например, расход *Q*, испарение *E* и т. д.); остальные обозначения нами уже использовались $\left(c_{ij} < 0\right)$.

Переходя от (5) к уравнению ФПК и аппроксимируя последнее системой дифференциальных уравнений для моментов, мы получаем (из-за нелинейности

функции $\varphi_{ij}\left(\vec{Y}\right)$) незамкнутую систему уравнений, в которой младшие моменты зависят от старших. Ситуация существенно упрощается, если $\varphi_{ij}\left(\vec{Y}\right)=Y_j$. В этом случае можно получить (процедуры подобного «получения» в теории случайных процессов известны уже несколько десятилетий) «развязанную» систему для первых $(m_i=\mathrm{M}[\vec{Y}])$ и вторых $(\alpha_{ij}=\mathrm{M}[\vec{Y}\vec{Y}'])$ начальных моментов:

$$\dot{m}_i=\sum_{p,q=1}^{n}\left(\bar{c}_{ip}+0{,}5G_{\tilde{c}_{iqqp}}\right)m_p+0{,}5\sum_{p=1}^{n}G_{\left(\tilde{c}\tilde{N}\right)_{ipp}}+\bar{N}_i; \tag{6}$$

$$\dot{\alpha}_{ij}=\sum_{p,q=1}^{n}\left(\bar{c}_{ip}+0{,}5G_{\tilde{c}_{iqqp}}\right)\alpha_{pj}+\left(0{,}5\sum_{p=1}^{n}G_{\left(\tilde{c}\tilde{N}\right)_{ipp}}+\bar{N}_j\right)m_j+$$
$$+\sum_{p,q=1}^{n}\left(\bar{c}_{ip}+0{,}5G_{\tilde{c}_{iqqp}}\right)\alpha_{ip}+\left(0{,}5\sum_{p=1}^{n}G_{\left(\tilde{c}\tilde{N}\right)_{jpp}}+\bar{N}_j\right)m_i+$$
$$+\sum_{p,q=1}^{n}G_{\tilde{c}_{ipjq}}\alpha_{pq}+\sum_{p=1}^{n}\left(G_{\left(\tilde{c}\tilde{N}\right)_{ipj}}+G_{\left(\tilde{c}\tilde{N}\right)_{jpi}}\right)m_p+G_{\tilde{N}_{ij}}. \tag{7}$$

Смысл «развязанности» в том, что уравнение (6) никак не зависит от уравнения (7) (в нелинейном случае такой «развязки» нет).

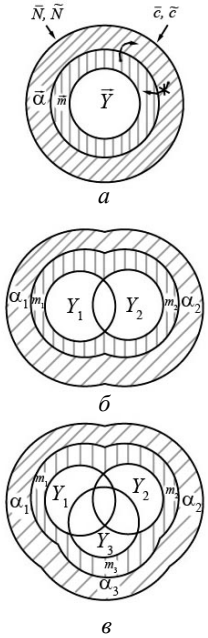


Рис. 3. Иллюстрация «выброса размерности»

Для уяснения ситуации имеет смысл визуализировать объект, описываемый системой (6), (7) (рис. 3). При переходе от исходной динамической модели (при $c=\bar{c}+\tilde{c};\quad N=\bar{N}+\tilde{N}$) к стохастическому уравнению (5), а затем к уравнению ФПК и его аппроксимации системой (6), (7) мы вектор фазовых переменных $\vec{Y}$ как бы делаем уязвимым для внешней среды, допуская взаимодействия с ней через шумы $\tilde{N}$ и $\tilde{c}$. При $G_{\tilde{c}}=\bar{c}$ внешняя среда начинает разваливать «двухслойную броню» в виде оболочек из $\vec{m}$ и $\vec{\alpha}$ (исходная динамическая модель при $c<0$ всегда устойчива; это и хорошо, и плохо, так как она не способна описывать процессы развития). При этом, во-первых, внешний слой $\vec{\alpha}$ (а в более общем случае – слои) менее устойчив, чем внутренний $\vec{m}$, а во-вторых – зависит от свойств внутреннего (но не наоборот).

Если оба слоя «пробиты» внешней средой $\left(G_{\tilde{c}}>2\bar{c}\right)$, то у системы есть две возможности: либо погибнуть, либо промутировать, объединившись с «пробившимися» элементами инфинитной реальности

в расширенную систему (рис. 3, *б*). Это и есть «выброс размерности» (появление нового компонента у вектора состояния $\vec{Y}$, а именно – Y_2). Предположим, что первая оболочка $\vec{\alpha}$ «пробита». Рассмотрим механизм «пробивания» второй оболочки и ее «заклеивания» с помощью введения новой фазовой переменной. Систему уравнений (6) запишем для одной переменной (математического ожидания):

$$\dot{m}_Q = -\left(\bar{c}_Q - 0{,}5G_{\tilde{c}_Q}\right)m_Q - 0{,}5G_{(\tilde{c}\tilde{N})Q} + \bar{N}_Q. \qquad (8)$$

Если $G_{\tilde{c}_Q} > 2\bar{c}_Q$, то последний заслон для распределения $p(Q)$ пробивается: расходы воды не представляют собой больше статистическую совокупность (по крайней мере, в рамках распределений Пирсона). Но ведь расходы воды никуда не делись, река осталась. Разрушился только «карточный домик» наших представлений о том, как живет (в статистическом смысле) река (ее режим стока). Давайте построим еще один «карточный домик», чтобы он не «пугался» больших значений интенсивности шума $G_{\tilde{c}_Q}$.

Вспомним, как получается динамическое уравнение для расхода. Балансовое соотношение $Q + E - \dot{X} = 0$ заменяется на $Q/k - \dot{X} = 0$ и вводится динамическая составляющая для возможности описания неравновесной ситуации $\dot{Q} = -cQ + N$, где $c = 1/k\tau$; $N = \dot{X}/\tau$. Далее мы «разрешаем» величинам c и N «шуметь» $\left(c = \bar{c} + \tilde{c},\ N = \bar{N} + \tilde{N}\right)$ с интенсивностями $G_{\tilde{c}}, G_{\tilde{N}}, G_{\tilde{c}\tilde{N}}$. Если параметр *c* «шумит» сильно $\left(G_{\tilde{c}} > 2\bar{c}\right)$, то уравнение (8) теряет устойчивость.

Давайте разберемся «кто шумит»? Параметром c так или иначе учитываются потери на испарение, которым «управляет» в основном температура воздуха, т. е. что-то инфинитное для речного бассейна. Поэтому можно включить испарение в состав вектора $\vec{Y}$. Но тогда система (6) примет вид:

$$\dot{m}_Q = -c_Q m_Q - c_Q m_E + \bar{N}_Q; \qquad (9)$$

$$\dot{m}_E = -c_E m_E - c_E m_Q + \bar{N}_E, \qquad (10)$$

где $c_Q = 1/\tau_Q$; $c_E = 1/\tau_E$; $\bar{N}_Q = \dot{X}/\tau_Q$; $\bar{N}_E = \dot{X}/\tau_E$ (здесь τ_Q, τ_E – время релаксации расхода и испарения соответственно). Если τ_Q и τ_E считать не случайными параметрами, то всякие основания для неустойчивости вообще исчезают; имеем «термостат» по мультипликативным шумам $\tilde{c}$ (но не по аддитивным $\tilde{N}$). Закон распределения $p(Q,E)$ стал устойчивым (по крайней мере, в отношении математического ожидания), но произошел «выброс размерности». Разумеется, реальная картина может быть (и практически всегда бывает) более сложной: и $\Delta U \neq 0$, и τ может иметь свое статистическое распределение.

Мы упростили систему (6) до одного уравнения (8), перегрузив (говоря языком С++) коэффициенты $\bar{c}_Q$ и $G_{\tilde{c}_Q}$. Пока оставшиеся «в тени» остальные уравнения ведут себя «тихо» (например, $\dot{m}_E \approx 0$), то подобная идеализация срабатывает. В противном случае переменная m_E «выходит на сцену» и «говорит», что без нее нельзя. Правда, обычно мы не знаем, что реально остается в тени, хотя методами фрактальной диагностики можно определить, сколько потенциальных фазовых переменных «затаилось в тени».

Проиллюстрируем ситуацию на наглядных картинках. Пусть имеем исходную модель для математического ожидания расхода

$$\dot{m}_Q = -cm_Q + \bar{N}_Q, \tag{11}$$

где c включает в себя как среднее значение $\bar{c}$, так и интенсивность шума $G_{\tilde{c}}$ $\left(c = \bar{c} - 0{,}5G_{\tilde{c}}\right)$; взаимную интенсивность шума $G_{\tilde{c}\tilde{N}}$ примем нулевой (в данном контексте это не существенно).

Будем считать, что такое же по структуре уравнение (теневое) справедливо для матожидания испарения m_E (оба уравнения «не знают» друг о друге). В зависимости от знака коэффициента c в уравнении (11) получаются устойчивые ($c > 0$) или неустойчивые ($c < 0$) решения, см. рис. 4, *а*. Неустойчивость по матожиданию m_Q можно проиллюстрировать более наглядно, если ввести в коэффициенты и внешние воздействия уравнений для m_Q и m_E периодические составляющие (см. рис. 4, *б* – режим для m_E периодический, но устойчивый, в отличие от решения для m_Q, которое нарастает из-за отрицательного значения $c : G_{\tilde{c}} > 2\bar{c}$).

Обращаю внимание читателя на то обстоятельство, что рис. 4, *б* есть просто «иллюзия»: на нем совмещены в одной фазовой плоскости две независимые переменные m_Q и m_E (они независимы, пока мы не перейдем к системе (9), (10). Сама по себе неустойчивость решения модели для m_Q просто индикатор: что-то не так, есть какое-то влияние, выводящее ситуацию за рамки предметной области, зафиксированной моделью (11). Природу этого влияния в самой модели не «выловить», нужны не формализуемые моделью творческие действия познающего субъекта.

Неустойчивость – индикатор «выброса размерности», проявление действия второй фазовой переменной (появления «флюса» на рис. 3, *б*). Объединив разрозненные уравнения типа (11) для m_Q и m_E в единую систему (9) и (10), мы ликвидировали мультипликативные шумы. Процесс стал устойчивым (рис. 4, *в* и 4, *г*), но двумерным. (По физическому смыслу перемененных m_Q и m_E они не

могут быть отрицательными.) Поэтому в модель (9), (10) для членов *cm* необходимо вводить либо знаковую функцию $\left(f(m) = \begin{cases} 0, & m \le 0, \\ 1, & m > 0 \end{cases} \right)$, либо множитель $\exp(-a\,|\,m\,|)\exp(am)$, где значение постоянной a должно согласовываться с шагами численного интегрирования.)

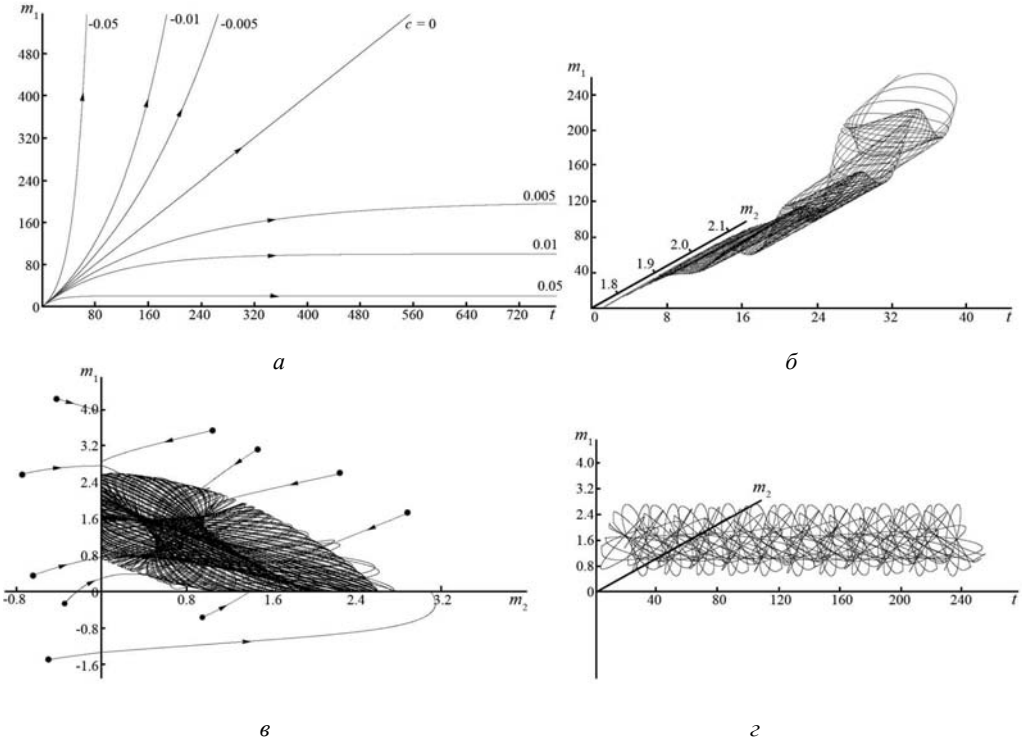
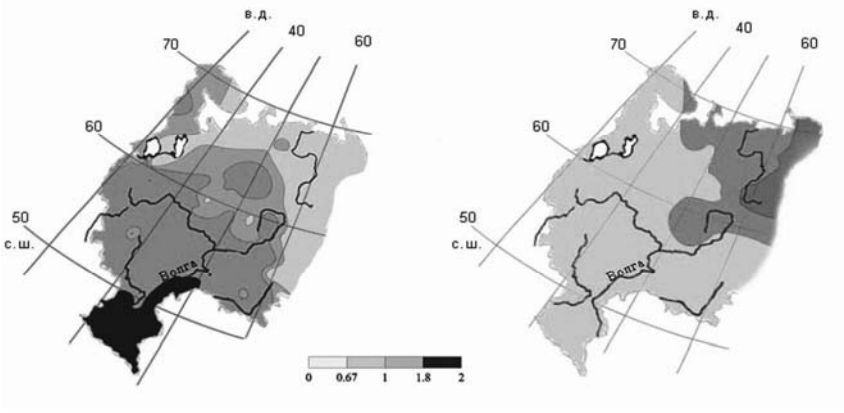


Рис. 4. Превращение неустойчивого (за счет «выброса размерности») одномерного процесса в устойчивый двумерный: *а* – влияние параметра *c* в модели (11) на поведение решения; *б* – двумерная траектория, устойчивая по фазовой переменной m_2 и неустойчивая по переменной m_1; *в* – пример появление аттрактора при переходе от неустойчивой одномерной модели с сильным шумом к двумерной модели, в которой «ответственность» за шумы из инфинитной реальности «взяла на себя» вновь введенная фазовая переменная; *г* – временная развертка аттрактора, изображенного на рис. 4, *в*

Географическое распределение зон с возможными неустойчивостями статистических моментов и выбросами размерности фазовых пространств

Формула (4) содержит величины, которые сравнительно легко определяются на основе сетевых наблюдений. Аналогичная формула применяется и для испарения, моделируемого также линейным формирующим фильтром (о гене-

рировании рядов испарений см. [Коваленко…, 2009]). На рис. 5 приведены карты распределения зон неустойчивости начальных моментов для годового стока и испарения, полученные по фактическим рядам наблюдений (при $\beta > 0{,}67$ процесс неустойчив по третьему моменту, при $\beta > 1$ – по второму, при $\beta \approx 2$ – по первому).



а *б*

Рис. 5. Распределение зон неустойчивости по стоку (*а*) и испарению (*б*)

Обращает на себя внимание относительная симметричность изменения критериев устойчивости для стока β_Q и испарения β_E. По стоку неустойчивость растет к югу, по испарению – к северу. На что реально указывает неустойчивость? Только на то, что в зонах неустойчивости ставится под сомнение модель формирования стока (испарения) в виде линейного формирующего фильтра (приводящая к семейству кривых Пирсона). Самое простое усложнение подобной модели сводится к «размораживанию» параметра релаксации $\tau_Q = W_Q/Q$ (здесь W_Q – константа, определяющая стоковую емкость бассейна; аналогичная формула используется и для модели испарения: $\tau_E = W_E/E$). С учетом этой формулы получается система нелинейных уравнений:

$$\frac{dQ}{dt} = -\frac{(Q+E)Q}{W_Q} + \frac{Q\dot{X}}{W_Q}; \tag{12}$$

$$\frac{dE}{dt} = -\frac{(Q+E)E}{W_E} + \frac{E\dot{X}}{W_E}. \tag{13}$$

Система (12), (13) содержит главные элементы многолетних водных балансов речных бассейнов; в случае необходимости учета изменения запасов воды в почво-грунтах, надо записать еще одно уравнение [Коваленко, 2008] или ввести коэффициент перед отрицательными членами в правых частях. Фазовые переменные этой системы тормозят рост друг друга ($\partial\dot{Q}/\partial E = -Q/W_Q < 0$,

$\partial\dot{E}/\partial Q = -E/W_E < 0$), т. е. имеет место конкурентный тип взаимодействия (за ресурс – осадки). Если, например, ограничиться одним уравнением (12), убрав E введением коэффициента стока, то получим нелинейные уравнение для расхода, дающее также одномодальное распределение плотности вероятности [Коваленко, 2007], не входящее, однако, в семейство кривых Пирсона.

Переходя к дискретному аналогу системы (12), (13) (при $dt \approx \Delta t = T = 1$ году), мы получим двумерное обобщение логистического отображения:

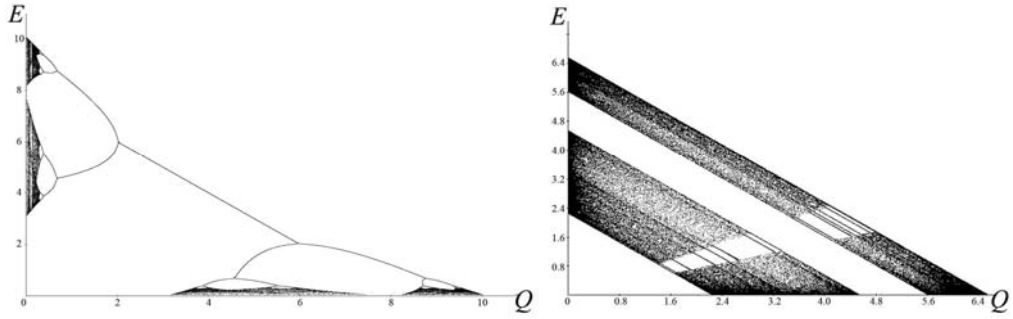
$$Q_{i+1} = -(Q_i + E_i)Q_i / Q_0 + \dot{X}Q_i / Q_0 + Q_i;$$

$$E_{i+1} = -(Q_i + E_i)E_i / E_0 + \dot{X}E_i / E_0 + E_i,$$

где $Q_0 = W_Q / T$; $E_0 = W_E / T$.

Бифуркационные параметры $(\dot{X} - E_i)/Q_0$ и $(\dot{X} - Q_i)/E_0$ в данном случае сами зависят от текущих значений фазовых переменных. Бифуркационная диаграмма представлена на рис. 6, *а*.

Она согласуется с рис. 5 (потеря устойчивости для испарения на севере и для расхода – на юге). В средней части диаграммы срабатывает линейная модель, не имеющая бифуркаций (между стоком и испарением происходит «взаимодействие» по типу нейтрализма, исключающего выбросы фазовых переменных). Если бы эта зона отсутствовала, то бифуркационная диаграмма имела бы вид, показанный на рис. 6, *б*. Она соответствует многомодальному двумерному распределению.



а *б*

Рис. 6. Бифуркационные диаграммы для различных вариантов задания емкостей стоковой и испарительной предметных областей: *а*) $Q_0 \gtrless E_0$; *б*) $E_0 \approx Q_0$.

В реальности конкурентный тип взаимодействия приводит к тому, что каждая из фазовых переменных «отодвигает» наступление бифуркации для другой переменной, так как в бифуркационные параметры они входят со знаком минус. Причем этот эффект остается в силе, если даже в системе (12), (13) одно из уравнений будет линейным. (В соответствии с рис. 5, в зоне неустойчивости по

стоку испарение практически всегда устойчиво и может быть описано линейной моделью; и наоборот.)

Таким образом, учет новых фазовых переменных может не только кардинально усложнить ситуацию, требуя двухмодального описания, но и в определенных географических зонах стабилизировать ситуацию, зафиксировав ее на одномодальных распределениях (правда выходящих за пределы семейства кривых Пирсона, которыми оперируют, в основном, гидрологи). Однако эта стабилизация носит географически локальный характер, так как уменьшение нормы стока по мере перемещения на юг (или испарения – на север) рано или поздно приведет к бифуркациям.

Выводы

В статье введено новое для гидрологии (и видимо для науки вообще) понятие «выброс размерности фазовых пространств моделей формирования многолетнего стока». С его помощью удается по-новому взглянуть на понятие «катастрофа» дополнив чисто утилитарное («бытовое») его содержание математическим смыслом, отличающимся от такового, принятого в известной теории катастроф. Можно говорить о катастрофах по статистическим моментам, сначала старших, а затем и младших (по мере увеличения интенсивности шумов), приводящих к неустойчивости всего вероятностного распределения в целом. Это ведет к невозможности статистически описывать экстремальные явления, в первую очередь наводнения. Возвратиться к такой возможности можно только введя в модель дополнительную переменную, характеризующую изучаемую систему (расширив фазовое пространство ее модели).

Получено несколько конкретных новых научных результатов:

1. Предложены стохастические модели формирования многолетнего речного стока, на основе которых можно как диагностировать возникновение статистических неустойчивостей, так и подавлять их путем увеличения размерности фазовых пространств. Этим способом удается восстановить предсказуемость «бытовых катастроф», которые перестают быть катастрофами в статистическом смысле.

2. Разработана и реализована практически методика диагностирования зон на европейской территории России, в которых формирование многолетнего стока и испарения с поверхности речных бассейнов происходит неустойчиво. С использованием ГИС-технологий получены соответствующие карты, из которых следует зеркальная симметрия этих зон для стока и испарения: степень неустойчивости формирования стока растет к югу, а испарения – к северу.

3. Предложена и реализована модель в виде двумерного логистического отображения, подтверждающая эмпирический вывод п. 2. Регионы одномодального формирования одновременно как стока, так и испарения возможны только в центральных широтах ЕТР при умеренных (не малых) значениях коэффициентов стока и испарения, неявно входящих в выражения для бифурка-

ционных параметров (например, в случае стока: $\left(\dot{X} - E_i\right)/Q_0 = \dot{X}/Q_0 - E_i/Q_0 = 1/k_Q - E_i/Q_0$). При малых значениях этих коэффициентов (юг для стока, север для испарения) значения бифуркационных параметров увеличиваются, что ведет к каскаду бифуркаций, приводящих к многомодальности.

4. Установлено, что конкурентный (за осадки) тип взаимодействия расхода и испарения ведет к уменьшению зоны действия бифуркационных механизмов, т. е. введение дополнительных фазовых переменных расширяет зоны устойчивого одномодального моделирования и прогнозирования гидрометеорологических процессов на бассейнах. Для других типов взаимодействия фазовых переменных это может быть и не так.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (проект № 2.1.1/3355).

Литература

1. *Коваленко В.В.* Частично инфинитная гидрология. – СПб.: изд. РГГМУ, 2007. – 230 с.
2. *Коваленко В.В.* Теория катастроф и эволюция дифференцируемых многообразий в частично инфинитной гидрологии. – СПб.: изд. РГГМУ, 2008. – 178 с.
3. *Коваленко В.В.* Гидрологическое обеспечение надежности строительных проектов при изменении климата. – СПб.: изд. РГГМУ, 2009. – 101 с.
4. *Коваленко В.В., Хаустов В.А.* Критерии устойчивого развития гидрологических процессов и картирование зон ожидаемых аномалий параметров годового стока рек СНГ при антропогенном изменении климата // Метеорология и гидрология, 1998, № 12, с. 96–102.
5. *Коваленко В.В., Гайдукова Е.В., Соловьев Ф.Л.* Идентификация статистических характеристик годового испарения на ЕТР для формирования диагностических моделей в задачах частично инфинитной гидрологии // Естественные и технические науки № 2. – М.: Компания Спутник +, 2009, с. 200–208.
6. *Коваленко В.В., Викторова Н.В., Гайдукова Е.В.* Моделирование гидрологических процессов. Изд. 2-е, исп. и доп. Учебник. – СПб.: изд. РГГМУ, 2006. – 559 с.
7. *Румянцев В.А., Бовыкин И.В.* Пространственно-временные закономерности колебания стока рек Евразии. – Л.: Наука, 1985. – 148 с.
8. *СП 33-101-2003.* Определение основных расчетных гидрологических характеристик / Госстрой России. – М.: ФГУП ЦПП, 2004.

Т.В. Векшина

ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ РУСЕЛ РЕК, ЗАРАСТАЮЩИХ РАСТИТЕЛЬНОСТЬЮ

T.V. Vekshina

HYDRAULIC RESISTANCE OF RIVER CHANNELS GROWING OVER WITH VEGETATION

Выявлены критериальные комплексы, необходимые для обобщенной количественной характеристики гидравлических сопротивлений зарастающих речных русел. На их основе рассчитана шкала характерных значений коэффициента шероховатости для русел рек ЕТР, зарастающих водной растительностью.

Ключевые слова: гидравлические сопротивления, зарастание русла, коэффициент шероховатости.

The criteria complexes necessary for a generalized quantity indicator of hydraulic resistance of river channels growing over with vegetation are revealed. Based on them, a scale of the reference values of the roughness coefficient is calculated for river channels in the European part of Russia growing over with vegetation.

Keywords: hydraulic resistance, overgrowth of a channel, roughness coefficient.

Ощутимому влиянию зарастания на движение потока подвержены малые и средние реки, которые составляют важнейшие элементы природных ландшафтов. Зарастание относится к процессам, протекающим в ландшафтной сфере, а они, как известно, развиваются под влиянием комплекса климатических, геоморфологических, гидрологических и гидродинамических факторов. Развитие водных растений играет вполне определенную роль в состоянии и эволюции речных экосистем [Баркович…, 2001]. Ни теория, ни лабораторные эксперименты пока не могут решить возникающий при этом комплекс задач: необходимы детальные гидравлические, русловые и гидроботанические полевые исследования.

Зарастание как фактор гидравлических сопротивлений (n_3), в отличие от шероховатости русла, отличает изменчивость во времени и зависимость от ландшафтно-климатических условий.

Величина n_3 зависит от фазы развития водных растений. С одной стороны, n_3 увеличивается по мере увеличения массы растений, а с другой – уменьшается из-за их старения, полегания и срыва. Эти процессы происходят хронологически закономерно, так что изменение n_3 может быть представлено в виде некоторой функции времени. Такая функция имеет однотипную аналитическую структуру в разные годы и для различных рек, если время от начала вегетации T выражено в долях от общей продолжительности зарастания русла $T_з$: $\tau = T/T_з$.

Учитывая, что вид этой функции устанавливается так, что $n_3 = n_0$ при $\tau = 0$ и отличается от n_0 на величину второго порядка малости при $\tau = 1$, можно предварительно записать:

$$n_3 = n_0/(1 - \kappa_1\tau + \kappa_2\tau^{\hat{a}}), \tag{1}$$

где κ_1 и κ_2 – коэффициенты пропорциональности.

В этом случае для расхода воды формула Шези–Маннинга будет иметь вид:

$$Q = \frac{\omega^{5/3}\sqrt{I}}{B^{2/3}n_0}(1 - \kappa_1\tau + \kappa_2\tau^{4/3}) . \tag{2}$$

На постах гидрологической сети измеряются уровни, расходы и температура воды, но, как правило, не выполняются измерения уклонов и тем более не оцениваются коэффициенты шероховатости. Что касается зарастания русла, то в изданиях водного кадастра (гидрологических ежегодниках) указывается только наличие растительности непосредственно в русле, без каких-либо сведений о степени её развития и распространения в поперечном сечении потока. В связи с этим в дальнейшем для характеристики гидрологических сопротивлений целесообразно рассматривать параметр Великанова $m = \sqrt{I/n}$ [Карасев…, 2001; Карасев, 1975]. Его особая ценность состоит в том, что он может быть определен по гидрометрическим данным, даже при отсутствии измерений уклона свободной поверхности. Так, из уравнения (2) с учетом (1) для зарастающего русла будем иметь:

$$m_3 = \frac{QB^{2/3}}{\omega^{5/3}} = \frac{\sqrt{I}}{n_0}(1 - \kappa_1\tau + \kappa_2\tau^{4/3}) . \tag{3}$$

Для определения m_3 по гидрометрическим данным как функции времени формуле (3) поставим в соответствие уравнение множественной линейной регрессии:

$$m_3 = a_0 - a_1\tau + a_2\tau^{4/3} , \tag{4}$$

в котором $m_3 = \dfrac{QB^{2/3}}{\omega^{5/3}}$; $x_1 = \tau$; $x_1 = \tau^{4/3}$.

Параметры уравнения (4) устанавливаются по совокупности измерений расходов воды и их элементов за время зарастания русла методом наименьших квадратов. Соответствующие расчеты выполнены нами для более чем 50 гидрометрических створов малых и средних рек, расположенных в северной, центральной и южной зонах Европейской территории России, выделенных Е.А. Леоновым [Леонов И.А., 1960; Голосов В.Н., 2001].

Некоторые результаты расчетов m_3 приведены в табл. 1, а на рис. 1 представлена часть хронологических графиков изменения m_3.

Достаточно высокие значения сводных коэффициентов корреляции свидетельствуют об адекватности выбора принятой аналитической структуры (4).

В результате анализа полученных данных установлено, что в естественных условиях зарастание русла, как правило, вызывает существенное увеличение гидравлических сопротивлений. В то же время наблюдается и несущественное изменение (менее 10 %), в этом случае зарастание можно считать гидравлически не значимым. Прослеживается зависимость экстремумов m_3 от средней за вегетационный период температуры воды: чем она выше, тем меньше m_3.

Таблица 1

Результаты расчетов параметра m_3 для характерных рек Европейской территории России

Река-Пост	Зона	Год	A, км^2	a_0	a_1	a_2	m_3	R	δ, %
Вьюн Запорожское	1	1958	54	0,44	–1,98	1,66	0,07	0,99	7,70
Вага Глуборецкая		1971	1410	0,69	–4,68	4,57	0,18	0,95	16,5
Сясь Яхново		1959	6230	0,23	–0,19	0,39	0,20	0,97	6,10
Вента Абава		1959	11 000	0,65	–0,77	0,70	0,43	0,56	9,48
Вятка Красноглине	2	1974	1212	0,54	–3,22	2,93	0,09	0,98	13,7
Барда Сенюшата		1974	1910	0,30	–0,68	0,51	0,12	0,82	18,4
Утроя Бол.Губа		1958	2900	0,28	–1,24	1,24	0,13	0,91	10,9
Сороть Осинкино		1958	3170	0,30	–1,76	2,00	0,14	0,91	19,0
Угра Мокрое		1971	10 800	0,31	–0,73	0,66	0,19	0,77	15,0
Луга Кингисепп		1958	12 500	0,46	–1,42	1,33	0,28	0,83	10,5
Елань Колено	3	1961	3230	0,47	–1,94	1,88	0,23	0,95	7,81
Иловля Александров		1960	6520	0,51	–2,58	2,67	0,20	0,88	14,5
Хопер Балашов		1960	14 300	0,25	–0,22	0,25	0,23	0,64	10,6

Таким образом, для отдельно взятого гидрологического поста приведенная методика интерпретации гидрометрических данных позволяет получить характеристики режима и количественные оценки гидравлических сопротивлений зарастающих русел. При этом объективно устанавливается сложность и неоднозначность проявлений зарастания.

Большое научно-практическое значение имеет обобщение полученных результатов и обоснование допустимости их распространения на неизученные объекты. Такую возможность открывает использование закономерностей изме-

нения гидроморфологических характеристик речных систем. В их структуре каждая отдельно взятая река рассматривается как звено – поток фиксированного порядка *N*. Оказалось целесообразным принять систему этих порядков, предложенную Н.А. Ржаницыным [Ржаницын, 1960], так как она разработана, главным образом, применительно к гидрографической сети Европейской территории России, являющейся объектом наших исследований.

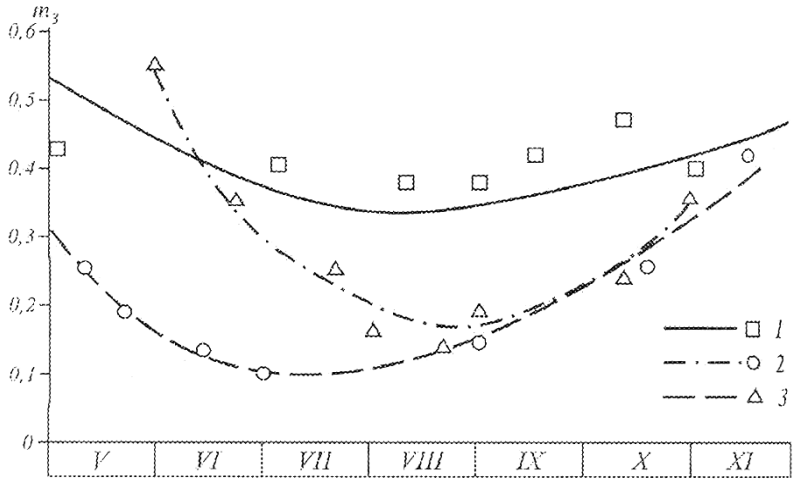


Рис. 1. Хронологический график изменения m_3: *1* – р. Воронеж г. Воронеж, 1960 г., *2* – р. Ловать–д. Сельцо, 1958 г., *3* – р. Вятка–с. Красноглинье, 1971 г.

В структуре речных систем устанавливается зависимость морфометрических характеристик от порядков потока *N* с нарастанием их от истоков к устью, а сами порядки определяются водностью реки. Если сток не изучен, эти характеристики, в конечном счете, могут быть поставлены в соответствие площади водосбора *A* (км^2).

Следует подчеркнуть особую роль уклона свободной поверхности, он равен осредненному уклону дна, если рассматривается равномерное движение на достаточно протяженном участке. В системном аспекте этот уклон не только служит мерой потерь энергии на движение потока, но также отражает геоморфологические условия речного бассейна, характер грунтов, из которых сложено русло, а следовательно, и его шероховатость. Более того, этот элемент теснейшим образом связан с порядком потоков и, в конечном счете, с гидрологическими и гидрографическими характеристиками речных систем.

Анализ результатов расчета параметров уравнения (3), приведенных в табл. 1, а также опубликованные данные других исследователей, приводит к следующим выводам:

В качестве определяющего фактора зарастания следует рассматривать площадь водосбора реки [Чалов, 1992; Кондратьев, 1982] как звена речной системы. Как установлено, на сравнительно больших реках с площадью водосборов

более A_0 = 25 000 км^2 зарастание русла не происходит, а прибрежная растительность не влияет на его пропускную способность. Чем меньше площадь водосбора, тем значительнее увеличение гидравлических сопротивлений в зарастающих руслах. Оно особенно велико на малых реках (A < 2000 км^2). Пороговое значение A_0 согласуется с зависимостью, установленной В.Н. Голосовым [Глосов, 2001] для коэффициентов доставки наносов с поверхности водосбора: их основная масса осаждается выше створа, замыкающего площадь $A_0 \approx$ 25 000 км^2. Но именно мелкофракционные илосодержащие отложения создают питательную базу для водных растений.

Повышение температуры воды сверх её порогового значения (8 ºС) является условием начала зарастания. Видовой состав водных растений мало изменяется по географической широте. И в северных, и в южных зонах ЕТР встречаются практически одни и те же растительные сообщества, отличаясь лишь интенсивностью своего развития в руслах [Антроповский, 1999; Барышников, 1990].

Таким образом, при обобщенной количественной оценке гидравлических сопротивлений зарастающих речных русел необходимо учитывать, по крайней мере, два критериальных комплекса:

– гидролого-гидрографический, который оказалось целесообразным представить как разность относительных значений линейных эквивалентов площадей водосборов:

$$P_1 = 1 - (\mathrm{A}/25\,000)^{0,5}\ ; \tag{5}$$

– зонально-климатический, представлен в виде относительной разности средней за вегетационный период температуры воды и её порогового значения 8 ºС:

$$P_2 = (t_в/8) - 1. \tag{6}$$

Оценке подлежат экстремальные значения относительных коэффициентов шероховатости

$$S_{\max} = \frac{(n_3)_{\max}}{n_0} = \frac{m_0}{(m_3)_{\min}}\ , \tag{7}$$

где m_0 и m_3 – параметры Великанова соответственно для свободного и заросшего русла. В качестве адекватной аппроксимации функции $S(P_1, P_2)$ принимается экспонента:

$$S_{\max} = \exp(a_1P_1 - a_2P_1^2)P_2\ , \tag{8}$$

которая удовлетворяет естественным физическим условиям: $S_{\max}$ = 1 при P_1 = 0 и P_2 = 0. Для определения параметров a_1 и a_2 представим (8) в логарифмическом виде:

$$y = \frac{\ln S_{\max}}{P_2} = a_1P_1 - a_2P_1^2\ . \tag{9}$$

Поле точек, рассчитанных по уравнению (9), представлено на рис. 2. По совокупности гидрометрических данных более чем для 30 створов на реках Европейской территории России методом наименьших квадратов получены следующие значения параметров уравнения (9): a_1 = 3,61; a_2 =2,40.

Функция (9) образует максимум y = 1,36, он соответствует максимуму-максиморуму при P_1 = 0,75, чему соответствует площадь водосбора A = 1560 км^2.

При дальнейшем уменьшении A, хотя и наблюдается снижение S_{max}, но оно остается несущественным, что объясняется значительным увеличением коэффициента шероховатости самого русла n_0, снижающим эффект относительного влияния зарастания на результирующее значение S_{max}.

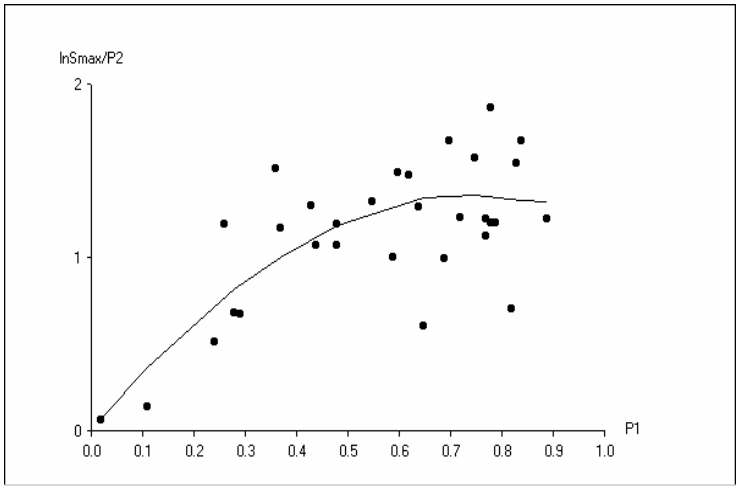


Рис. 2. Системно-зональная зависимость относительных коэффициентов шероховатости от гидролого-гидрографических и климатических факторов

После выполнения вычислительных операций и преобразований получаем следующую зависимость, позволяющую рассчитать параметр Великанова для неизученной реки с площадью водосбора A в любой момент относительного времени τ от начала вегетации водных растений:

$$m_3 = 2{,}16[1 - 9{,}2(\tau - 0{,}99\tau^{4/3})(1 - \frac{1{,}04}{S_{max}})]/A^{0{,}15}. \quad (10)$$

S_{max} определяется по формуле, вытекающей из выражения (9):

$$S_{max} = \exp(3{,}61P_1 - 2{,}40P_1^2)P_2 . \quad (11)$$

Преобразуя формулу (10) с использованием установленных выше соотношений, получаем уравнение, описывающее изменение коэффициента шероховатости зарастающего русла в течение вегетационного периода:

$$n_3 = 0{,}051/A^{0{,}067}[1 - 9{,}2(\tau - 0{,}99\tau^{4/3})(1 - \frac{1{,}04}{S_{max}})] . \quad (12)$$

Формулы (11) и (12) являются обобщенными системно-зональными зависимостями, так как они опираются на гидроморфологические характеристики речных систем и климатические параметры – соотношения начальной и средней за вегетационный период температур воды, т.е. на самые общие сведения, которые содержатся в изданиях водного кадастра и банках данных современных геофизических информационных систем. В результате становится возможной расчетная оценка пропускной способности русла неизученных рек. Естественно, для каждого конкретного створа величины коэффициентов шероховатости рассчитываются с той или иной степенью приближения. Но в сравнении с соответствующими описательными шкалами шероховатости зарастающих русел количественная определенность полученных зависимостей дает все основания для их предпочтения.

На этой основе нами рассчитана шкала характерных значений максимальных и осредненных коэффициентов шероховатости в зависимости от порядка реки и средней за период вегетации температуры воды $t_в$. Результаты расчетов представлены в табл. 2. В наших расчетах приняты следующие значения $t_в$: 12; 14 и 16 °С соответственно для Севера, Центра и Юга ЕТР.

Табл. 2 в полной мере отражает широкий диапазон изменений коэффициентов шероховатости зарастающих русел как по зонам ЕТР, так и по порядкам рек. Чем меньше порядок реки, тем больше зональная изменчивость коэффициента шероховатости. Гидравлические сопротивления русел больших рек менее чувствительны к зарастанию и, соответственно, отличаются меньшим диапазоном изменения коэффициентов шероховатости.

Таблица 2

Зонально-сезонные значения коэффициентов шероховатости зарастающих русел рек ЕТР

A, км^2	Зоны ЕТР								
	Север			Центр			Юг		
Порядок потока	n_{max}		$n_{ср}$	n_{max}		$n_{ср}$	n_{max}		$n_{ср}$
	$n_{вл.}$	$n_{л.}$	$n_{ло.}$	$n_{вл.}$	$n_{л.}$	$n_{ло.}$	$n_{вл.}$	$n_{л.}$	$n_{ло.}$
300	0,065		0,049	0,097		0,061	0,130		0,069
VII	0,048	0,059	0,045	0,057	0,084	0,052	0,064	0,107	0,057
1000	0,062		0,046	0,093		0,057	0,124		0,064
VIII	0,045	0,056	0,042	0,054	0,080	0,049	0,059	0,101	0,053
3500	0,056		0,042	0,084		0,052	0,112		0,058
IX	0,041	0,050	0,038	0,048	0,071	0,044	0,054	0,090	0,048
8000	0,043		0,035	0,064		0,044	0,085		0,050
X	0,034	0,039	0,033	0,042	0,056	0,039	0,047	0,072	0,043
22 500	0,016		0,017	0,024		0,023	0,031		0,028
XI	0,017	0,018	0,015	0,023	0,024	0,022	0,028	0,029	0,027

Несомненно, полученные системно-зональные зависимости подлежат дальнейшему уточнению, но уже и в первом приближении они обеспечивают объективность и единство подхода к оценке гидравлических сопротивлений зарастающих речных русел.

Литература

1. *Беркович К.М., Чалов Р.С., Чернов А.В.* Экологическое русловедение. – М: ГЕОС, 2000.
2. *Карасев И.Ф., Сунцова Е.Б.* Пропускная способность русла и учет стока зарастающих рек // Гидротехническое строительство, 2001, № 1.
3. *Карасев И.Ф.* Русловые процессы при переброске стока. – Л.: Гидрометеоиздат, 1975.
4. *Леонов Е.А.* Некоторые характеристики зарастающего русла в связи с методикой учета стока воды // Труды ГГИ, 1960, вып. 77, с. 74–86.
5. *Голосов В.Н.* Перераспределение наносов в верхних звеньях флювиальной сети земледельческих регионах: теория вопроса и опыт регионального анализа (на примере равнин умеренного пояса) // Эрозия почв и русловые процессы, 2001, вып. 13, с. 94–119.
6. *Ржаницын Н.А.* Морфологические и гидрологические закономерности речной сети. – Л.: Гидрометеоиздат, 1960.
7. *Чалов Р.С.* Общее географическое и инженерное русловедение: предмет исследований и положение в системе наук // Вестн. Моск. ун-та, сер. 5, География, 1992, № 6, с. 10–16.
8. *Кондратьев Н.Е., Попов И.В., Снищенко Б.Ф.* Основы гидроморфологической теории руслового процесса. – Л.: Гидрометеоиздат, 1982.
9. *Антроповский В.И.* Морфология долин и деформации русел рек в карстовых районах Европейской части России // Труды V конф. «Динамика и термика рек, водохранилищ и прибрежной зоны морей». – М.: ИВП РАН, 1999.
10. *Гришанин К.В.* Гидравлические сопротивления естественных русел. – Л.: Гидрометеоиздат, 1992.
11. *Барышников Н.Б.* Антропогенное воздействие на русловые процессы. – Л.: изд. ЛГМИ, 1990.

Н.Б. Барышников, Е.С. Субботина

УЧЁТ ОСОБЕННОСТЕЙ МОРФОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ РАСЧЁТНОГО УЧАСТКА ПРИ ОПРЕДЕЛЕНИИ ПРОПУСКНОЙ СПОСОБНОСТИ РУСЕЛ С ПОЙМАМИ

N.B. Baryshnikov, E.S. Subbotina

DETERMINATION OF THE FLOODPLAIN RIVER CHANNELS DISCHARGE CAPACITY BASED ON MORPHOLOGICAL PATTERNS OF THE CONSIDERED RIVER SECTION

Выполнен анализ влияния особенностей морфологического строения русел и пойм на гидравлику потоков в них. Рекомендована методика оценивания веса инерционных членов уравнения движения потока с переменным по длине расходом воды на основе сведений о морфометрических характеристиках русел и пойм.

Ключевые слова: русло, пойма, морфометрические характеристики, инерционные члены, уклон свободной поверхности.

Analysis of influence of river channels and floodplains' morphologic patterns on hydraulic characteristics of the flow is performed in this paper. A methodology of the inertial terms estimation is proposed for the motion equation that describes streams with variable water discharge based on morphological parameters of river channels and floodplains.

Keywords: river bed, floodplain, morphometric characteristics, inertial terms, water surface slope.

Резкое обострение циклонической деятельности в последние годы, в частности над европейским континентом, привело к значительному увеличению числа и главное мощности катастрофических паводков. В качестве примера можно привести паводки, прошедшие на территории Польши и Германии в 1997 году, существенно превысившие паводки предшествующего периода. Так на реке Висле предшествующий наивысший паводок, близкий к $1^0/_0$ – обеспеченности, наблюдался в 1926 году. Паводок же 1997 года, значительно его превысивший, был оценён польскими специалистами вероятностью 1 раз в 300−1000 лет, т.е. 0,33–0,1 $^0/_0$ обеспеченности. Однако в 2010 году на реке Висле прошёл ещё больший паводок, значительно превысивший паводок 1997 года и затопивший не только несколько небольших городов, но даже частично и такие большие города как Краков и Варшаву. При этом было разрушено несколько мостов и других гидротехнических сооружений. Это, в частности, свидетельствует о необходимости совершенствования расчётных методик, основанных на данных о максимальных расходах воды редкой обеспеченности. Последние, к сожалению, как правило, не измеряются.

Методы расчётов, в частности, рекомендуемые нормативными документами основаны либо на теории равномерного движения [Наставление НИМП −

72 и др.], либо на теории неравномерного, неустановившегося движения [Барышников, 1984, 2008]. В первом случае расчёты выполняются на основе формулы Шези $v = C\sqrt{h\,I}$. В этой методике используются следующие морфометрические характеристики: глубина, ширина и площадь водного сечения как русел, так и пойм. При применении к пойменным руслам, к сожалению, результаты расчётов имеют большие погрешности, значительно превышающие допустимые пределы. Это привело к необходимости совершенствования этих методов, в частности, на основе уравнения движения потока с переменным по длине расходом воды, которое для русел с односторонними поймами имеет вид:

$$I_{\text{р}} = \left(\frac{v^2}{C^2 h}\right)_{\text{р}} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\alpha_{\text{К}} v^2}{2g}\right)_{\text{р}} + \left(\frac{q' v'}{gF'}\right)_{\text{р}} + \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\alpha_{Б} v}{g}\right)_{\text{р}} \tag{1}$$

$$I_{\text{п}} = \left(\frac{v^2}{C^2 h}\right)_{\text{п}} + \frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{\alpha_{\text{К}} v^2}{2g}\right)_{\text{п}} + \left(\frac{q' v'}{gF'}\right)_{\text{п}} + \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\alpha_{Б} v}{g}\right)_{\text{п}} \tag{2}$$

$$\frac{\partial(Q_{\text{р}} + Q_{\text{п}})}{\partial x} + \frac{\partial(F_{\text{р}} + F_{\text{п}})}{\partial t} = 0 \tag{3}$$

Здесь *v, I, F* − соответственно скорость, уклон свободной поверхности и площадь водного сечения; $\alpha_{\text{К}}$ и $\alpha_{\text{Б}}$ − коэффициенты Кориолиса и Буссинеска; q' − удельный расход воды за счёт массообмена между русловым и пойменным потоками; v' и F' − скорости массообмена между этими потоками и площадь продольного сечения, на которой происходит этот массообмен; «р» и «п» − индексы, означающие, что параметры относятся к русловому или пойменному потокам.

Обозначив второй, третий и четвёртый члены уравнений (1) и (2) соответственно через ε_1, ε_2 и ε_3 и назвав их инерционными [Скородумов, 1965], выражение для средней скорости потока можно представить в виде:

$$v = C\sqrt{hI\left(1 - \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3}{I}\right)}\,. \tag{4}$$

Необходимо оценить веса инерционных членов этих уравнений и при их значимых величинах выявить влияние на них особенностей морфологического строения русел и пойм на расчётном участке. Коэффициент Шези *C* некоторые авторы [Гончаров, 1962 и др.] называли коэффициентом формы сечения, т.е. он находится в прямой зависимости как от формы сечения, так и от других морфометрических характеристик русла и поймы. Общий вид формулы $C = f(R, n, B/h)$, здесь гидравлический радиус *R* и коэффициент сечения *B/h*

являются основными морфометрическими характеристиками русел и пойм. Расчёты, проведённые различными авторами на основе натурных [Скородумов, 1965] и лабораторных данных [Барышников, 1989, 2007], показали, что наибольшая величина первого инерционного члена (ε_1/I) составляет 55% по натурным данным [Скородумов, 1965] и 80% по данным лабораторных исследований на установке, где оси русла и поймы сходились или расходились под углами 5º–20º [Барышников и др., 2008] т.е. является вполне значимой. Более того, была установлена прямая зависимость первых двух инерционных членов уравнения от угла α и средней глубины руслового потока вида $\frac{\varepsilon_1}{I} = f(tg\alpha, h_p / h_{p.б})$ и $\frac{\varepsilon_2}{I} = f(tg\alpha, h_p / h_{p.б})$. Следует отметить, что при больших углах α ≥ 90º, русло реки, как правило, полностью заносится наносами и в нём прекращается движение руслового потока [Великанова З.М., 1980]. Более того, при углах α > 90º, как это показали натурные исследования [Карасёв, 1980], в русле при его частичном занесении наносами наблюдается обратное течение руслового потока.

Аналогичные расчёты были проведены и для оценки веса второго инерционного члена ε_2 на основании натурных данных по рекам Луге и Пьяне. Наибольшее значение ε_2 / I составило 20%, а по данным лабораторных измерений 25%, т.е. также значимая величина [Барышников, 2007]. Аналогичные расчёты выполнены и для оценки третьего инерционного члена на основе натурных данных более чем по 50 рекам. Средняя величина ε_3 / I составила доли процента при наибольшем значении в 5%, т. е. этой величиной вполне можно пренебречь [Барышников, 1978].

Таким образом из трёх инерционных членов уравнения движения потока с переменным по длине расходом воды только два являются значимыми. По-видимому, нестационарность движения не полностью учитывается третьим инерционным членом уравнений [Барышников, 2007]. Если морфометрические характеристики руслового потока разработаны давно и достаточно успешно используются в расчётных уравнениях, то с аналогичными характеристиками пойм дело обстоит значительно сложнее. Это обусловлено сложным морфологическим строением пойм и, что особенно важно, изменением их морфометрических характеристик по длине и с уровнем воды. Такие характеристики пойм как средняя глубина, ширина, да и площадь сечения, особенно при меандрирующих типах пойм, при изменении уровней воды имеют ступенчатый вид. Действительно, при затоплении каждой последующей «ступеньки» пойм, как правило резко увеличиваются ширины и площади поперечного сечения и соответственно резко уменьшаются средние глубины. Ещё более сложным является характер изменения морфометрических характеристик пойм по длине. По определению Н.И. Маккавеева, поймы в плане имеют «чётковидный» характер

[Маккавеев, 1965], т.е. их ширина и другие характеристики значительно изменяются по длине реки. Таким образом, морфометрические характеристики пойм – несовершенны и не только не отражают особенности изменения морфологии пойм при увеличении уровней воды, но и, что является особенно важным, они не отражают особенностей изменения морфологического строения пойм по длине реки. В то же время эти морфометрические характеристики являются основными расчётными параметрами при расчётах пропускной способности пойм и пойменных русел. Это играет решающую роль особенно при расчётах катастрофических расходов воды. Поэтому важным явилось введение автором в качестве расчётной интегральной характеристики − угла α, между динамическими осями руслового и пойменного потоков [Барышников, 1984]. Определение этого угла по данным натурных измерений – сложная задача, так как для этого необходимо иметь натурную информацию не только по измерениям расходов воды детальным способом, но и сведения о векторах скоростей на бровке прирусловой вала и данных измерений на втором, близко расположенном гидростворе. Поэтому автором была разработана методика определения этого угла α на основе крупномасштабных картографических данных [Барышников, 1984, 2007]. При этом было сделано допущение, что угол между динамическими осями взаимодействующих потоков был принят равным углу между геометрическими осями русла и поймы.

Следует признать, что угол α, хотя и является важной интегральной морфометрической характеристикой, но он не полностью отражает особенности морфологического строения пойм. Другими расчётными морфометрическими характеристиками пойм могут быть характеристика формы поперечного сечения поймы *B/h,* и возможно морфометрические характеристики пойменных массивов, предложенные И.В. Поповым [Поповым,1969]. Однако попытки использовать эти характеристики в качестве расчётных успеха не имели.

Вторым, пожалуй, главным, недостатком расчётных методик является отсутствие данных, да и самой методики измерений уклонов свободной поверхности пойменных потоков. Поэтому при расчётах пропускной способности пойм приходится уклон свободной поверхности пойменных потоков приравнивать уклонам свободной поверхности русловых потоков, что приводит к большим погрешностям расчётов.

Уклоны свободной поверхности пойменных, а так же и русловых потоков, при их взаимодействии с пойменными, находятся в прямой зависимости от морфометрических характеристик русел и пойм. Действительно, как это установлено в работах автора [Барышников, 1984, 2007], уклон свободной поверхности руслового потока, при его взаимодействии с пойменным потоком находится в прямой зависимости от угла α и относительной глубины $h_p / h_{р.б}$ руслового потока (рис. 1).

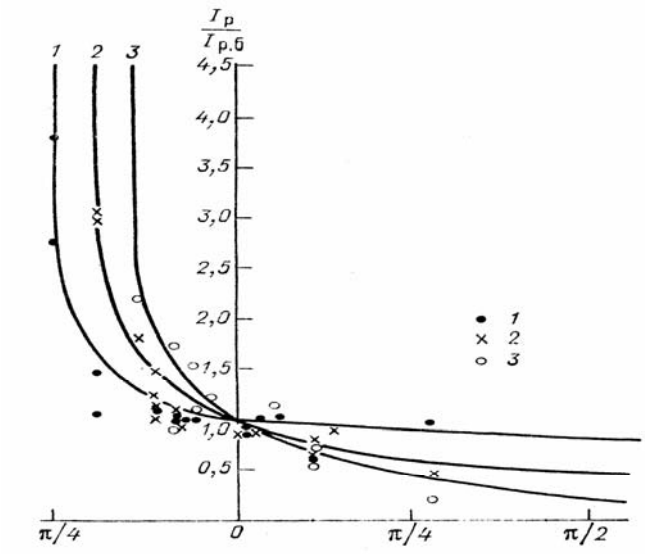


Рис. 1. Кривые $I/I_{р.б}=f(h_р/h_{р.б}, \alpha)$. 1 – $h_р/h_{р.б}$=1.10; 2 – $h_р/h_{р.б}$=1.25; 3 – $h_р/h_{р.б}$= 1.50.

Проведённый анализ и расчёты позволяют сделать следующие выводы и предложения:

- гидрологические характеристики русловых и пойменных потоков определяются особенностями морфологического строения русел и пойм на расчётном участке и, в конечном итоге, находятся в прямой зависимости от морфометрических характеристик;
- морфометрические характеристики русел можно признать достаточно хорошо разработанными и широко используемыми в гидрологических расчётах;
- морфометрические характеристики пойм недостаточно учитывают особенности их морфологического строения. Существенным достижением, позволившем усовершенствовать методику расчётов средних скоростей русловых потоков при их взаимодействии с пойменными, явилось введение в качестве интегральной характеристики особенностей морфологического строения русел и пойм, угла α между динамическими осями русловых и пойменных потоков;
- большое значение имеет усовершенствование методики определения этого угла α, основанной на крупномасштабных планово-высотных картографических материалах;
- необходимы дальнейшие глубокие проработки, направленные на разработку методов измерений и расчётов уклонов свободной поверхности пойменных потоков, основанных на особенностях морфологического строения пойм и русел;
- необходима разработка новых или совершенствование имеющихся морфометрических характеристик пойм, учитывающих особенности их морфологи-

ческого строения не только в створе измерений, но и на расчётном участке значительной длины.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.2.1 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной Росси» на 2009–2013 годы (государственный контракт № П1079 от 24 августа 2009 г.) по направлению «География и гидрология суши»

Литература

1. Барышников Н.Б. Речные поймы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1978.– 152 с.
2. *Барышников Н.Б.* Морфология, гидрология и гидравлика пойм. ─ Л.: Гидрометеоиздат, 1984. − 280 с.
3. *Барышников Н.Б., Самусева Е.А*. Антропогенное воздействие на саморегулирующуюся систему бассейн – речной поток – русло − СПб.: РГГМУ, 1999. – 218 с.
4. *Барышников Н.Б.* Динамика русловых потоков. − СПб.: изд. РГГМУ, 2007. – 314 с.
5. *Барышников Н.Б., Пагин А.О., Польцина Е.В., Селина Т.С.* Учёт кинематического эффекта в методах расчёта пропускной способности пойменных русел.// Метеорология и гидрология, 2008, №10. – с.80−85.
6. *Великанова З.М., Ярных Н.А.* натурные исследования гидравлики пойменного массива в высокое половодье // Труды ГГИ,1970 вып.183,с.35−83.
7. *Гончаров В.Н.* Динамика русловых потоков. − Л.: Гидрометеоиздат, 1962. − 375 с.
8. *Карасёв И.Ф.* Речная гидрометрия и учёт водных ресурсов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. − 310 с.
9. Наставление по изысканию и проектированию железнодорожных и автодорожных мостовых переходов через водотоки [НИМП-72]. – М.: Транспорт, 1972. − 280 с.
10. *Попов И.В.* Деформации речных русел и гидротехническое строительство– Л: Гидрометеоиздат, 1969. – 363 с.
11. *Скородумов Д.Е.* Вопросы гидравлики пойменных русел в связи с задачами построения и экстраполяции кривых расходов воды // Труды ГГИ,1965 вып.128,с.23−96

МЕТЕОРОЛОГИЯ

И.Н. Русин

ВЛИЯНИЕ НА РАСЧЕТ ИНСОЛЯЦИИ ПОГРЕШНОСТЕЙ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ПОЛОЖЕНИЯ СОЛНЦА

I.N. Rusin

IMPACT ON THE CALCULATION INSOLATION ERRORS IN DETERMINING THE POSITION OF THE SUN

Точность вычисления солнечной радиации, поступающей на заданный участок подстилающей поверхности, является важнейшим фактором, влияющим на погрешность моделей микроклимата, и зависит от погрешностей определения характеристик положения солнца. В работе рассмотрен вопрос о чувствительности расчетов инсоляции к точности задания исходных данных о географических координатах, времени и рельефе подстилающей поверхности. Показано, что при верификации компьютерных моделей микроклимата или экстраполяции данных наблюдений радиационного баланса на окружающую территорию результаты расчетов можно признать удовлетворительными, если их погрешность не превышает 20 Вт м$^{-2}$ в равнинной или 50 Вт м$^{-2}$ в горной местностях.

Ключевые слова: погрешность, инсоляция, точность расчета, высота, азимут, часовой угол, точность цифровая модель рельефа.

The accuracy of the calculation of solar radiation arriving at a given area of land surface, is a major factor affecting the accuracy of models of microclimate and depends on the errors in determining the characteristics of the sun position. Sensitivity calculations of insolation depending on the accuracy of data on geographical coordinates, time, and relief of the underlying surface is under consideration. It is shown that computer models of microclimate, or the results of extrapolation of observational data of radiation balance on the surroundings can be considered correct if their error does not exceed 20 W / m2 in the plain, or 50 W / m2 in the mountains.

Keywords: error, insolation, the calculation accuracy, altitude, azimuth, hour angle, the accuracy of digital elevation model.

Исследования микроклимата приобретают все большее значение, поскольку необходимо уловить и спрогнозировать вариации параметров среды жизнедеятельности человека в условиях наблюдаемых изменений глобального климата. Особое место в этих исследованиях занимает расчет энергетического баланса. Определяющим фактором энергетического баланса, как известно, является радиационный баланс подстилающей поверхности, целиком зависящий от при-

ходящей солнечной радиации. Густота и расположение актинометрических станций на земной поверхности, как правило, не подходят для решения микроклиматических задач. Поэтому в настоящее время интенсивно развиваются методы расчетной экстраполяции актинометрических данных отдельных станций на основе метеорологических моделей радиации с использованием общедоступных географических характеристик окружающей территории [1, 2, 3].

При создании и в процессе эксплуатации таких моделей возникает вопрос о допустимой погрешности исходных данных. Известно [5], что относительная погрешность отдельных измерений наиболее распространенными современными актинометрическими приборами (пиранометрами) составляет в среднем ±3 % (максимально ±3 %) измеряемой величины [4]. Погрешность измерения суммарной радиации по данным высокоточных наземных наблюдений – 3–6 % (8 Втм$^{-2}$), обычных наземных сетевых наблюдений – 6–12 %, (18 Втм$^{-2}$), погрешность восстановления суммарной радиации у земной поверхности по данным ИСЗ составляет 20 % (35 Вт м$^{-2}$). Учитывая такой уровень погрешности наблюдений, неясно, насколько точно следует рассчитывать положение солнца в заданный для расчета момент.

Этот аспект расчетов во многих случаях считают второстепенным и либо используют громоздкие формулы астрономических расчетов, в которых постоянные задаются с девятью десятичными знаками [6, 7], либо используют простейшие соображения для оценки склонения солнца и его часового угла [1, 3]. И тот, и другой путь не согласован с применяемой методикой актинометрических наблюдений. Кроме того, оценка погрешности расчета инсоляции указывает предельно необходимую точность расчета остальных составляющих уравнения теплового баланса подстилающей поверхности. Наконец, назрела необходимость оценить применимость упрощенных методов оценки положения солнца, применяемых для приближенных оценок инсоляции. Этот круг вопросов будет рассмотрен в данной работе.

Ниже используются термины «солнечная постоянная» и «инсоляция». Здесь термин солнечная постоянная (I_0) обозначает суммарный поток солнечного излучения, проходящий за единицу времени через единичную площадку, ориентированную перпендикулярно потоку, на расстоянии одной астрономической единицы от Солнца вне земной атмосферы. В соответствие с последними рекомендациями [8], среднее за год значение солнечной постоянной принято считать равным 1366,1 Вт м$^{-2}$, но в течение года оно меняется вследствие эллиптичности земной орбиты. Термин инсоляция (I_h) здесь обозначает внеатмосферную солнечную радиацию, приходящую за единицу времени на единицу площадки, горизонтально ориентированной на заданной широте (φ). Значение инсоляции ($I_h = I_0 \sin h$) зависит от высоты солнца (h) над горизонтом в момент расчета.

Изменения солнечной постоянной при движении солнца по эллиптической орбите в зависимости от номера дня года (D) можно приближенно оценить по формуле Спенсера [3]:

$$I_0 = 1366.1 \cdot \left[1.00011 + 0.034221\cos(\varphi_D + \varphi_1) + 0.000719\cos(2\varphi_D + \varphi_2)\right];$$
$$\varphi_D = \frac{2\pi(D-1)}{365}; \quad \varphi_1 = 0.037386; \quad \varphi_2 = 0.106686. \tag{1}$$

Простой расчет показывает, что считая солнечную постоянную одинаковой весь год (это равносильно признанию орбиты Земли круговой), получим абсолютную погрешность ±47 Втм$^{-2}$ (от 1320 Вт м$^{-2}$ летом Северного полушария до 1414 Вт м$^{-2}$ зимой Северного полушария), а относительную погрешность ±3,5 %. Это существенно больше ошибки наблюдений.

Межсуточная изменчивость солнечной постоянной максимальна вблизи равноденствий и составляет 0,06 % от ее средней за год величины. Значит, в течение одних суток ее допустимо не пересчитывать. Но за десять суток изменения весной и осенью составляют уже 7,5 Втм$^{-2}$. И фиксируя ее значение на больший промежуток времени, получим ошибку большую, чем точность высокоточных актинометрических наблюдений. Это значит, что можно не изменять значение солнечной постоянной в течение любой декады года. Относительная погрешность такого предположения составит 0,5 %. С другой стороны, если принять гипотезу, что излучение солнца в течение декады не меняет интенсивность, то не следует добиваться большей точности в остальных звеньях расчета метеорологической модели радиации.

Приняв за основу то, что можно считать точными расчеты с погрешностью, не превышающей 7,5 Втм$^{-2}$, можно оценить, с какой точностью следует вычислять высоту солнца, чтобы не увеличивать суммарную абсолютную погрешность расчета инсоляции. Формула абсолютной погрешности мгновенного значения инсоляции получается путем простых выкладок:

$$I_h = I_0 \sin(h) \Rightarrow dI_h = dI_0 \sin(h) + I_0 \cos(h)\, dh \le dI_0;$$
$$\Delta h \le \frac{dI_0}{I_0}\left|\frac{1-\sin(h)}{\cos(h)}\right|\frac{180^0}{\pi} < 0.5\frac{dI_0}{I_0}\left|\frac{1-\sin(h)}{\cos(h)}\right|\frac{180^0}{\pi}. \tag{2}$$

Погрешность высоты солнца можно признать допустимой, если она не приводит к изменению инсоляции более чем на половину допустимой погрешности расчета солнечной постоянной. Например, если допустить, что погрешность расчета высоты солнца составляет четверть видимого солнечного диска (угловой размер dh = 7,8 угловых минут), то погрешность расчета инсоляции окажется такой же, как и ошибка, связанная с отклонением солнечной постоянной от среднедекадной (7 Втм$^{-2}$). Вклад погрешности определения высоты солнца наиболее важен при больших высотах солнца, как это показано в табл. 1, вычисленной по формуле (2).

Таблица 1

Допустимая погрешность определения высоты солнца для расчета инсоляции горизонтальной поверхности

Высота солнца в градусах	1	5	10	30	45	60	75	85	89
Абсолютная погрешность инсоляции горизонтальной поверхности (Вт м$^{-2}$)при ошибке высоты солнца на 8 угловых минут (¼ солнечного диска)	3,3	3,76	4,32	6,17	7,08	7,51	7,43	7,28	7,09

Теперь следует выяснить, с какой точностью нужно вычислять склонение солнца и его часовой угол, чтобы получать его высоту с указанной погрешностью. Расчет высоты и азимута солнца (A) для заданных склонения солнца (δ), часового угла солнца (τ) и широты (φ) производится по формулам [9]:

$$\begin{gathered} h = \arcsin\left[\sin(\delta)\sin(\varphi) + \cos(\delta)\cos(\varphi)\cos(\tau)\right]; \\ A = \mathrm{Atan2}\left[\cos(\varphi)\sin(\tau) - \sin(\delta); \cos(\delta)\cos(\varphi)\cos(\tau)\right]. \end{gathered} \tag{3}$$

Нужно отметить, что использование для вычисления азимута двухместной функции Atan2(x, y) вместо обычного arctg(y/x) удобно, так как по ней сразу получается азимут, отсчитываемый от направления на юг в диапазоне ($-\pi$, $+\pi$).

Для оценки влияния погрешностей в аргументах на значение высоты солнца был использован метод статистического моделирования. Для заданных широт, склонений и часовых углов были рассчитаны по сто значений погрешностей определения высоты солнца по формуле:

$$\begin{gathered} \Delta h_i = h_i - h, \quad i = 1...100; \\ h_i = \arcsin\left[\sin(\delta + e_1)\sin(\varphi + e_2) + \cos(\delta + e_1)\cos(\varphi + e_2)\cos(\tau + e_3)\right]; \\ h = \arcsin\left[\sin(\delta)\sin(\varphi) + \cos(\delta)\cos(\varphi)\cos(\tau)\right]; \\ e_k = 2\left(Rnd(k) - 0.5\right)\cdot a, \qquad k = 1,2,3. \end{gathered} \tag{4}$$

Здесь h_i – случайное значение высоты солнца, вычисленной по заданным δ, φ, τ, к которым добавлены значения случайной величины e_k , равномерно распределенной на интервале [$-a$, a].

Рассмотрен диапазон склонений от –22 до 22 ^{0} и диапазон широт от 70 ^{0} Ю до 70 ^{0} С. Часовые углы для каждой пары (δ, φ) выбраны путем вычисления продолжительности дня и деления его на пять частей: восход, середина дополуденной части дня, полдень, середина послеполуденной части дня, закат.

Для каждого набора (δ, φ, τ) были вычислены средние квадратичные погрешности σ_h и подобраны пороговые значения случайных ошибок аргументов a так, чтобы максимальное значение σ_h по всем наборам не превышало ранее определенные предельные значения погрешности определения высоты солнца

(0,13 градуса), гарантирующие попадание инсоляции внутрь заданного диапазона точности (7 Втм$^{-2}$).

Найденное пороговое значение *a* и принято за оценку допустимой ошибки аргументов. Оно оказалось достаточно стабильным. Например, если не вводить ошибок в широту и часовой угол, то погрешность расчета высоты 0,13 ^{0} достигается при погрешности задания склонения солнца 0,18 ^{0}. Если ошибка вводится только в часовой угол, то погрешность высоты 0,13 ^{0} достигается при погрешности задания часового угла 0,25 ^{0} (это 1 минута времени).

Если, приближаясь к реальным условиям, допустить, что все аргументы могут иметь погрешности, то погрешность высоты солнца погрешность высоты 0,13 ^{0} достигается при погрешности часового угла 0,1 ^{0}. Этот уровень погрешностей и можно считать пороговым, если, как указано выше, принять фиксированное за декаду значение солнечной постоянной.

Интересно перевести погрешности, полученные в угловых единицах, для широты – в единицы длины, а для часового угла – в единицы времени. Тогда окажется, что 0,1 ^{0} погрешности по широте составляют примерно 11 км, а по часовому углу – 0,4 минуты. Теперь следует оценить, какие ошибки возможны при расчете положения солнца за счет погрешности задания исходных данных.

Расчет положения солнца представляет собой хорошо изученную астрономическую задачу. В настоящее время имеется несколько высоко точных алгоритмов и интернет-калькуляторов, реализованных на их основе (см., например [6]). В данной работе будет использован алгоритм расчета положения солнца из работы [10]. Формулы достаточно просты и легко программируются, но громоздки, требуют не менее девяти десятичных знаков после десятичной точки и, как будет показано ниже, для климатологических расчетов не обязательны. Поэтому они не приведены, а только перечислены основные этапы расчета высоты солнца (h), азимута солнца (A) и часового угла солнца (τ): 1) по дате (YY.MM.DD) и универсальному времени (TT), определяется юлианская дата; 2) затем она вместе с универсальным временем и долготой интересующего пункта используется для расчета местного звездного времени; 3) по местному звездному и универсальному временам определяется долгота солнца, а по ней его эклиптические координаты; 4) производится преобразование эклиптических координат в экваториальные геоцентрические (прямое восхождение и склонение); 5) прямое восхождение используется для пересчета местного звездного времени в часовой угол солнца, а затем по часовому углу и склонению вычисляются по формулам (1)–(2) высота и азимут солнца. Погрешность использованного алгоритма, согласно [10], менее пяти угловых секунд (1 минута по времени). Расчет характеристик положения солнца по такому способу удовлетворяет введенным выше требованиям к погрешности по времени, далее считался эталонным и называется «метод 1».

Для выявления роли возможных погрешностей исходных данных при расчете инсоляции по методу 1 с использованием формул (3)–(4) были проведены

статистические испытания. Для заданных широт, долгот, дат и времени были вычислены характеристики положения солнца (высота и азимут), а также инсоляция. Затем в эти значения были внесены случайные, равномерно распределенные возмущения различной амплитуды (*a*), вновь произведены расчеты положения солнца и инсоляции и вычислены погрешности результатов. Построив выборки погрешностей результатов, состоящие из ста значений, получены максимальные и средние квадратичные погрешности. Наиболее характерные примеры приведены в табл. 2.

Номерами в этой таблице обозначены следующие эксперименты, относящиеся к 16.00 ч 22.06.2010, $\varphi = 45^0$, $\lambda = 30^0$: 1 – $\Delta YY = 0$, $\Delta MM = 0$, $\Delta DD = 0$, $\Delta TT = 0{,}083$ ч (5 мин), $\Delta\varphi = 0$, $\Delta\lambda = 0$; 2 – $\Delta YY = 0$, $\Delta MM = 0$, $\Delta TT = 0$, $\Delta\varphi = 1{,}25^0$; $\Delta\lambda = 0$; 3 – $\Delta YY = 0$, $\Delta MM = 0$, $\Delta TT = 0$, $\Delta\varphi = 0$, $\Delta\lambda = 1{,}25^0$ (5 минут по времени); 4 – для оценки роли погрешности склонения в исходное состояние внесено изменение $\Delta DD = 4$ суток; 5 – для оценки роли погрешности склонения изменена дата (22.03.2010) и в это состояние внесена случайная погрешность $\Delta DD = 1$ сутки); 6 – погрешности экспериментов 1, 2, 3 внесены одновременно в исходное состояние; 7 – внесены погрешности экспериментов 1, 2, 3 и случайная погрешность в дату $\Delta DD = 1$ сутки; 8 – условия эксперимента 7 перенесены на дату 22.03.2010; 9 – в условиях эксперимента 7 блокирован ввод погрешностей в широту и долготу. Строки 10, 11, 12 из табл. 2 будут прокомментированы далее в тексте.

Табл. 2 иллюстрирует следующие выводы из проделанных расчетов. Наибольшие погрешности в определении инсоляции горизонтальной поверхности расчетным путем возникают за счет возможных погрешностей определения времени. Это важно учитывать, поскольку в реальных условиях разовые актинометрические измерения могут продолжаться несколько минут. Погрешности задания географических координат не существенны, если точность их задания менее 1 градуса, что всегда выполняется. Однако, если учесть, что погрешность в 1 градус долготы равносильна систематической погрешности в 4 минуты местного времени, то понятно, что она является предельно допустимой. Интересно отметить, что малость изменения инсоляции за декаду в сочетании с несущественным влиянием на инсоляцию погрешностей определения широты и долготы места, не превышающих 1 градус, дает основание заключить, что пространственно временной «объем» 1 градус широты, 1 градус долготы и 10 суток по времени – это наименьший элемент глобального климата Земли. Меньшие пространственные масштабы уже должны быть отнесены к мезо и микроклимату, а меньшие временные промежутки – к погоде.

Совместное возникновение ошибок положения и времени увеличивает погрешность в определении инсоляции, как показывает эксперимент 6. Положение ухудшается, но не очень сильно, если такие погрешности относятся к датам, близким к весеннему или осеннему равноденствиям, как это видно из сравнения экспериментов 6 и 8. Отсюда следует, что время суток следует определять со

значительно большей точностью, чем склонение. Это нетрудно делать, учитывая современное развитие службы времени. А вычисление склонения можно делать по формулам, учитывающим только изменение даты, как это и было принято в метеорологии. Определяя время расчета или наблюдения с точностью до 1 минуты, мы все-таки повышаем погрешность оценки положения солнца до размеров видимого солнечного диска (31,5 угловых минут), что увеличивает, согласно табл. 2, допустимую погрешность расчета инсоляции примерно до 16–18 Втм$^{-2}$, но согласуется с уровнем точности наблюдений [5].

Таблица 2

Чувствительность характеристик положения солнца ($\Delta\delta$, $\Delta\tau$, Δh, ΔA в градусах) и инсоляции горизонтальной поверхности (ΔI, в Втм$^{-2}$) к случайными возмущениями исходных данных

Эксперимент №	Вид ошибки	$\Delta\delta$	$\Delta\tau$	Δh	ΔA	ΔI
1	Максим	0,000038	1,16	0,85	0,75	18,68
	СКО	0,000021	0,68	0,46	0,44	10,16
2	Максим	0	0,00	0,02	0,02	0,52
	СКО	0	0,00	0,01	0,01	0,33
3	Максим	0	0,08	0,06	0,05	1,22
	СКО	0	0,05	0,03	0,03	0,73
4	Максим	0,0082	0,22	0,08	0,13	1,57
	СКО	0,031	0,13	0,07	0,10	1,46
5	Максим	0,39	0,08	0,23	0,33	5,39
	СКО	0,27	0,05	0,16	0,23	3,76
6	Максим	0,0014	1,23	0,89	0,87	21,32
	СКО	0,00080	0,73	0,52	0,52	12,40
7	Максим	0,0047	1,23	0,74	0,80	16,23
	СКО	0,0067	0,73	0,49	0,47	10,94
8	Максим	0,40	1,24	1,09	1,05	26,13
	СКО	0,27	0,73	0,57	0,53	13,79
9	Максим	0,40	1,32	0,98	1,21	23,53
	СКО	0,31	0,68	0,56	0,49	13,55
10	Средняя	0,25	0,73	0,04	0,37	0,23
	СКО	0,058	0,02	0,04	0,05	0,67
11	Средняя	0,20	–3,34	0,72	–0,45	13,14
	СКО	0,098	0,06	0,07	0,08	1,23
12	Средняя	0,20	0,15	0,1	0,21	1,41
	СКО	0,098	0,04	0,07	0,08	1,22

Поскольку наибольший вклад в погрешность расчета инсоляции вносит время, можно выяснить пригодность более простых, чем астрономические, формул для определения склонения и часового угла солнца. Примеры подобных формул достаточно многочисленны. В данной работе были использованы два метода. Один, более изощренный, предложен в работе [11]. Он состоит из формул:

$$nd = 30 * (MM - 1) + DD;$$
$$Ls = 4.871 + 0.0175nd + 0.033\sin(0.0175nd);$$
$$\delta = \arcsin(0.398\sin(Ls));$$
$$\tau = \lambda + 0.043\sin(2Ls) - 0.033\sin(0.0175nd) + 0.265t - \pi. \quad (5)$$

Здесь новые обозначения: DD – номер дня месяца; nd – номер дня года; Ls – долгота солнца в радианах; t – местное время. Остальные обозначения определены выше. Эти формулы были использованы в расчетах мгновенного радиационного баланса подстилающей поверхности с точностью до 20 Втм$^{-2}$. В данной работе расчеты по этим формулам обозначаются как «метод 2».

В качестве «метода 3» использованы самые простые соображения, часто применяемые в различных учебно-тренировочных расчетах. Они выражаются формулами

$$nd = DD - DS;$$
$$\delta = \frac{\pi}{180} \cdot \delta_0 \cdot \sin(2\pi \cdot nd / 365); \quad (6)$$
$$\tau = (UT + \frac{\lambda}{15} - 12) \cdot \frac{\pi}{12}.$$

Здесь через DD – номер дня годя от начала; DS обозначена дата весеннего равноденствия; nd – число дней от весеннего равноденствия; $\delta_0 = 23{,}44\ ^0$, UT – универсальное время, вычисляемое по поясному с учетом поправок на декретное и летнее.

В методе 3 часовой угол солнца просто приравнивается к местному среднему солнечному времени, поэтому для более корректного учета неравномерности движения Земли вокруг солнца можно исправить местное солнечное время, введя уравнение времени. Выражение для уравнения времени (η) было заимствовано из работы [12], хотя проверялись и другие варианты, не приводя к заметным различиям. Прибавляя η к местному солнечному времени, можно получить часовой угол более точно по формуле

$$\tau = (UT + \frac{\lambda}{15} + \eta - 12)\frac{\pi}{12};$$
$$\eta = \frac{1}{60}\left[9.5889\sin\left(\frac{4\pi n}{365.24} + 3.5884\right) - 7.6546\cos\left(\frac{2\pi n}{364}\right)\right]. \quad (7)$$

Здесь n – число дней от перигелия Земли, а уравнение времени дано в долях часа. Как оказалось, без существенной погрешности можно использовать и другие варианты уравнения времени или просто пользоваться астрономическими календарями. Использование формулы (6) с учетом (7) названо «методом 4».

Оценка применимости упрощенных методов для расчета положения солнца при вычислении инсоляции горизонтальной поверхности была проведена, как и в выше описанных случаях, методом статистического моделирования. Для множества широт, долгот и дат были рассчитаны по сто случаев как по точному алгоритму (метод 1), так и по приближенным (методы 2, 3, 4). Во всех методах были введены одинаковые случайные погрешности, аналогичные расчету 8 табл. 2.

Результаты оказались слабо чувствительными к вариации широт, долгот и дат в указанных выше пределах. Главный вклад в погрешности снова вносит погрешность определения времени. Примеры средних и средних квадратичных разностей характеристик, полученных приближенными методами 2, 3, 4 оценки положения солнца и точным методом 1, приведены в строках 10, 11 и 12 табл. 2. Можно убедиться, что, даже используя самый простой метод 3 оценки положения солнца, получаем погрешность расчета меньшую, чем если в точный метод внесена случайная погрешность определения времени в пределах пяти минут. Это также видно из сравнения строк 11 и 12 табл. 2. Последняя из них получена с единственным отличием от предыдущей: добавлено уравнение времени, которое дает поправку в несколько минут. Результаты различаются очень существенно.

Можно утверждать, что применение точных методов определения положения солнца не гарантирует нам уменьшение ошибки при сравнении результатов расчета с данными измерений, которые могут оказаться смещенными по времени, хотя и в пределах, допустимых методикой актинометрических наблюдений. Это также означает, что при актинометрических наблюдениях следует регистрировать время наблюдений с точностью не меньшей минуты.

В холмистых и горных районах инсоляция поверхности I_{hs} зависит от угла между солнечными лучами и нормалью к склону hs и азимута склона As по формулам [9]:

$$\begin{gathered} I_{hs} = I_0 \sin(hs); \\ hs = \arcsin\left[\cos(G)\sin(h) + \sin(G)\cos(h)\cos(Az - As)\right]. \end{gathered} \tag{8}$$

Здесь h и Az – высота и азимут солнца, рассчитываемые по формулам (3) и (4); G – угол наклона склона; As – азимут склона, отсчитываемый, как и азимут солнца от направления на юг. Эти величины можно найти, используя цифровую модель рельефа $z = H(x, y)$, по формулам:

$$\begin{gathered} G = \arccos\left[\left(1 + |\nabla H|^2\right)^{-0.5}\right]; \quad \text{где} \quad |\nabla H| = \sqrt{\left(\frac{\partial H}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial H}{\partial y}\right)^2}; \\ As = \mathrm{Atan2}\left[\frac{\partial H}{\partial y}; \frac{\partial H}{\partial x}\right]. \end{gathered} \tag{9}$$

Погрешности определения высоты и азимута солнца исследованы выше. Погрешности определения угла наклона и азимута склона можно найти извест-

ными методами теории погрешностей, считая, что производные вычисляются по схеме центральных разностей на сетке с шагом d, причем погрешность оценивается методом удвоения шага.

$$\frac{\partial H}{\partial s} = \frac{H(s+d) - H(s-d)}{2d} + R;$$
$$R = \frac{H(s+2d) - 2H(s+d) + 2H(s-d) - H(s-2d)}{4d} \cong \frac{3\varepsilon}{2d}. \quad (10)$$

Последнее равенство в этой формуле получено на основе предположения, что значения высот рельефа известны со случайной ошибкой ε, однородной и изотропной в пространстве.

Формулы абсолютных погрешностей расчета угла наклона и азимута склона имеют вид:

$$\delta G \le \frac{2\delta H}{1+|\nabla H|^2} = \frac{3\varepsilon}{\left(1+|\nabla H|^2\right)\cdot d}; \quad \delta As \le \frac{2\delta H}{|\nabla H|} = \frac{3\varepsilon}{|\nabla H|\cdot d}. \quad (11)$$

Величину $\frac{\varepsilon}{|\nabla H|\cdot d}$ можно интерпретировать как относительную ошибку оценки уклона рельефа. Проведенные оценки [13] показывают, что она составляет около 1% для детализированных цифровых моделей рельефа, построенных с шагом около 10 м, причем может возрастать до 3 % в зависимости от применяемого метода численного дифференцирования. Еще более эта оценка ухудшается при переходе к шагам 100 и более метров. (Для наиболее распространенной модели GTOPO30 [14] расстояние между точками составляет 30 угловых секунд, т.е. около 0,6 км на широте 50 ^{0}, а средняя квадратичная погрешность высот до 50 м.)

Принимая оценку относительной погрешности определения уклона в 3 %, согласно (12), получим, что абсолютная погрешность определения уклона склона составляет около 0,1 радиана (примерно 6 ^{0}), для уклонов меньше 20 ^{0} (для больших уклонов она уменьшается). Аналогично получим, что абсолютная погрешность оценки азимута склона составляет 0,1/tg*G*. Она будет больше для уклонов менее 45 %, а для больших уклонов уменьшается.

Поскольку роли уклона и азимута в формуле (9) аналогичны ролям широты и часового угла в исследованной выше формуле (3), то выводы относительно требуемой точности широты и часового угла можно применить и к *G* и *As*. Проведенные оценки показывают, что погрешность 6 ^{0} в определении уклона (или азимута) склона увеличивает среднюю квадратичную погрешность расчета инсоляции на наклонную поверхность до 41 Вт м$^{-2}$ (или до 56 Вт м$^{-2}$ для азимута). То, что погрешность расчета азимута склона приводит к большим, чем погрешность уклона, ошибкам представляется понятным, поскольку она входит в фор-

мулу аналогично времени, на которое наиболее сильно реагирует рассчитанная инсоляция.

Сказанное выше позволяет сделать вывод, что при верификации компьютерных моделей микроклимата или экстраполяции данных наблюдений радиационного баланса на окружающую территорию результаты расчетов можно признать удовлетворительными, если их погрешность в равнинных регионах не превышает 20 Вт м$^{-2}$. В горных районах существующие цифровых моделей рельефа с шагом более 100 м позволяют вычислять инсоляцию склона только с погрешностью до 50 Вт м$^{-2}$. Эти оценки определяет и верхнюю границу точности, к которой следует стремиться при расчете остальные составляющих уравнения теплового баланса подстилающей поверхности.

Литература

1. *Rensheng Chen, Ersi Kang, Xibin Ji.* 2007 An hourly solar radiation model under actual weather and terrain conditions: a case study in Heihe river basin. Energy, 32: 1148–1157.
2. *Quan Wang, Wang John Tenhunen, Markus Schmidt, Olimpia Kolcun*. 2006 A Model to Estimate Global Radiation in Complex Terrain. Boundary-Layer Meteorology 119:2, 409–429.
3. *Psiloglou B. E., Kambezidis H. D.* 2007 Performance of the meteorological radiation model during the solar eclipse of 29 March 2006. Atmos. Chem. Phys. Discuss., 7, 12807–12843.
4. *HydroLynx Systems, Inc.Model* 4015, Pyranometer. Instruction Manual. 2004. http://www.hydrolynx.com/_manuals/4015.pdf.
5. *James H., Jeffrey H.* 2010. Evluating the accuracy of solar radiation data sourse. Solar Data Warehouse. http://www.solardatawarehouse.com/Data.aspx#Data_Accuracy.
6. *Reda I., Andreas A.* 2003 (Revised January 2008) .Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications. 55 pp.; NREL Report No. TP-560-34302.
7. *Blanco-Muriel M. et al.* 2001.Computing the Solar Vector. Solar Energy. Vol. 70. No. 5, pp. 431–441, 2001.
8. *Darula S., Kittler R., Gueymard Ch.* 2005. Reference luminous solar constant and solar luminance for illuminance calculations. Solar Energy. Vol. 79, 5, pp. 559–565.
9. *Кондратьев К.Я.* Актинометрия. – Л.: Гидрометеоиздат, 1965.
10. *Меес Ж.* Астрономические формулы для микрокалькуляторов. – М.: Мир, 1988. – 168 с.
11. *Holtslag A.A., Van Ulden A.D.* 1983. A simple scheme for Daytime estimates of the surface fluxes from routine weather data // J. of Climate and applied meteorology, vol. 22, pp. 517–529.
12. *Whitman A.M.* 2007. A simple expression for the equation of time. Journal of the North American Sundial Society 14 pp. 29–33. http:// www58.homepage.villanova.edu/ alan.whitman/eqoftime.pdf.
13. *Warrena S.D., Hohmannb M.G., Auerswaldc K., Mitasova H.* 2004. An evaluation of methods to determine slope using digital elevation data. Catena, 58 215–233.
14. http://eros.usgs.gov/#/Find_Data/Products_and_Data_Available/gtopo30_info.

А.Е. Шадурский, В.А. Лобанов

ОЦЕНКА РЕГИОНАЛЬНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ НА СЕВЕРЕ ЗАПАДНОЙ СИБИРИ

A.E. Shadursky, V.A. Lobanov

ASSESSMENT OF REGIONAL CLIMATE CHANGE IN NORTHERN WEST SIBERIA

Рассмотрено проявление климатических изменений в рядах среднемесячных температур воздуха, месячных сумм осадков и максимальных в году суточных осадков на севере Западной Сибири. На основе применения статистических критериев оценки однородности и стационарности получено, что ряды температур воздуха являются практически стационарными за исключением температур марта. Ряды осадков оказались нестационарными в месяцы холодной части года, но эта нестационарность имеет ступенчатый вид и обусловлена сменной регистрирующих приборов в 1960-е годы. Установлены пространственно-временные закономерности осадков.

Ключевые слова: изменение климата, температура воздуха и осадки, статистические критерии, оценка однородности и стационарности, пространственно-временные закономерности.

Result of impact of climate change is considered for time series of monthly air temperature and precipitation as well as maximum daily precipitation in the northern Western Siberia. On the basis of statistical criteria for assessing the homogeneity and stationarity, we show that the time series of air temperatures are almost stationary except for the temperature of March. Time series of precipitation were nonstationary in the cold months of the year, but this unsteadiness has step-like and is due to the replacement recording devices in 1960 s. Spatial and temporal regular properties of precipitation have been obtained.

Keywords: climate change, temperature and precipitation, statistical tests, assessment of homogeneity and stationarity, space-time regular properties.

Современное изменение климата по-разному влияет как на различные метеорологические характеристики, так и на одни и те же характеристики в разных районах Земли. Поэтому наиболее актуальной становится проблема оценки региональных изменений климата, от результатов решения которой зависит дальнейшая стратегия принятия решений и адаптации. В качестве одного из ключевых районов России выбран север Западной Сибири, включающий Ямало-Ненецкий и Ханты-Мансийский автономные округа. С одной стороны этот регион является основным источником нефте и газодобычи для России, а с другой, по сценарным оценкам изменений климата, территорией, где, например, по модели HadCM3 разработанной Хадли Центром (Великобритания), будут иметь место наибольшие на Земле повышения температуры воздуха на 8–10 °С при увеличении глобальной температура на 4 °С [Gordon, 2000]. Поэтому очевидно, что именно

здесь следует ожидать наиболее существенное воздействие изменения климата на экономику и инфраструктуру, состоящую из построенных и проектируемых нефте и газопроводов, автомобильных и железных дорог, населенных пунктов.

Для анализа выбраны 16 метеостанций в рассматриваемом районе с наиболее продолжительными рядами наблюдений за среднемесячной температурой воздуха, суммами осадков за месяц, а также наибольшими в году суточными осадками, расчетные 1 %-ные значения которых являются важной характеристикой при строительном проектировании. Чтобы оценить насколько климатические изменения проявляются в рядах выбранных метеорологических характеристик уже сегодня, были использованы статистические методы оценки стационарности средних значений и дисперсий. Расчетные формулы статистик критерия Фишера для оценки однородности дисперсий и Стьюдента для оценки однородности средних значений имеют следующий вид [Закс, 1976]:

$$F = \frac{\sigma_1^2}{\sigma_2^2}; \tag{1}$$

$$t = \frac{Y_{\text{ср}1} - Y_{\text{ср}2}}{\sqrt{n_1\sigma_1^2 + n_2\sigma_2^2}} \sqrt{\frac{n_1 n_2 (n_1 + n_2 + 2)}{n_1 + n_2}}, \tag{2}$$

где F, t – расчетные значений статистик критериев Фишера и Стьюдента; $Y_{\text{ср}1}$, $Y_{\text{ср}2}$, σ_1^2, σ_2^2 – средние значения и дисперсии двух последовательных выборок при условии $\sigma_1^2 > \sigma_2^2$; n_1 и n_2 – объемы выборок.

Если в анализируемых рядах имели место статистически значимая автокорреляция и асимметрия, то они учитывались при оценке по критериям в соответствии с Рекомендациями [Рекомендации, 1984]. Кроме того, на неоднородность средних значений и особенно дисперсий могут влиять аномальные экстремумы, однородность которых априори оценивалась по критериям Диксона и Смирнова-Граббса [Рекомендации, 1984]. Многолетние ряды разбивались или на две равные по количеству лет наблюдений подвыборки или по дате наибольшего ступенчатого изменения, если такое имело место. Уровень значимости (α) обычно задается равным 5 %, что соответствует принятию нулевой гипотезы об однородности с вероятностью 95 %. В результате гипотеза однородности может быть принята в том случае, если расчетное значение статистики меньше соответствующего критического. Вместе с тем, расчетное значение статистики критерия может быть и больше критического, но ненамного. Поэтому лучше рассматривать диапазон области принятия гипотезы [Закс, 1976], в соответствии с которым можно считать, что если уровень значимости, соответствующий расчетному значению статистики, находится в диапазоне α = 3–5 %, то гипотеза может быть условно принята, а при α в диапазоне 1–2,9 % – условно отклонена.

Прежде всего, был проведен анализ стационарности многолетних рядов среднемесячных температур воздуха, на основе которого получено, что из 384

случаев проверки гипотезы стационарности (16 метеостанций × 12 рядов среднемесячных температур × 2 критерия) нестационарность выявлена всего в 19 случаях, что составляет 4,9 % от их общего числа. Причем практически половина всей нестационарности приходится на март и характеризуется ступенчатым увеличением температуры с начала 1960-х годов. В качестве примера на рис. 1 приведен график нестационарного ряда наблюдений температуры марта на метеостанции Октябрьское, где ступенчатое увеличение температуры, характерное для большинства станций этого района, обусловлено вероятнее всего сменой условий атмосферной циркуляции.

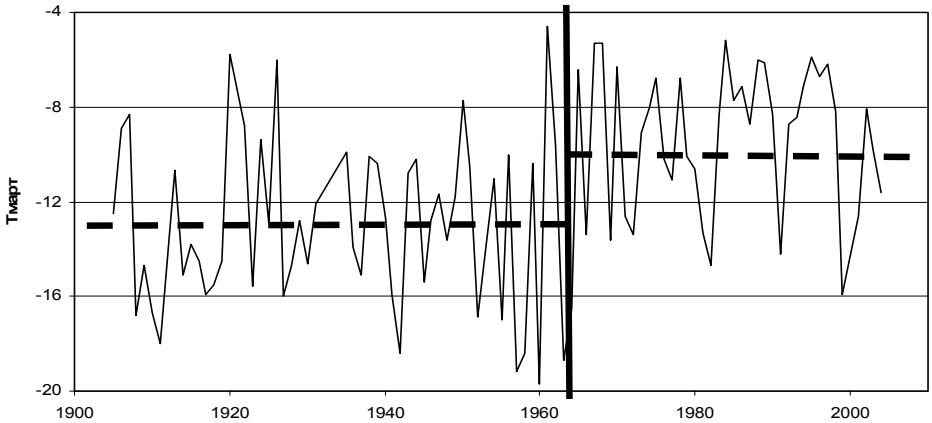


Рис. 1. Нестационарность средних значений в многолетнем ряду среднемесячных температур марта на метеостанции Октябрьское

В остальных случаях вывод о нестационарности приходится в основном на диапазон α = 1–2,9 %, имеет место для дисперсии и для отдельных метеостанций в отдельные месяцы.

Следующей рассматриваемой характеристикой были суммы осадков за отдельные месяцы года. Анализ исходных графиков показал ступенчатое увеличение осадков в начале 1960-х годов и поэтому многолетние ряды разбивались на две подвыборки по этой дате. В результате получено, что нестационарных данных было уже намного больше (17,7 % от общего числа случаев) и практически все они (85 % всех случаев нестационарности) приходились на холодный период года и имели место большей частью на северных метеостанциях станциях района. Типичный график нестационарного многолетнего ряда осадков приведен на рис. 2 для ноября по метеостанции Новый Порт. Этот и другие подобные графики нестационарных рядов свидетельствуют о том, что нестационарность обусловлена сменой приборов для регистрации осадков как раз в 1960-е годы, причем предшествующий осадкомер не позволял нейтрализовать ветровое выдувание осадков, что особенно характерно для твердых осадков и для станций, находятся на морском побережье в зоне больших ветров.

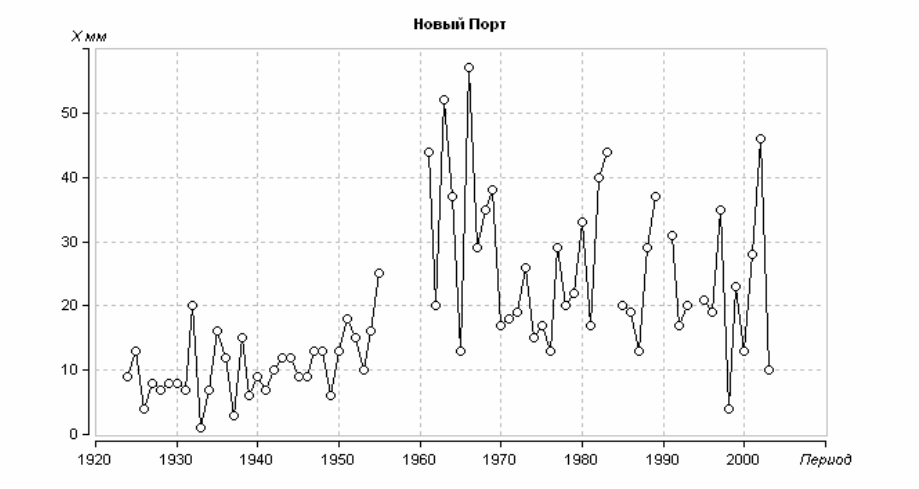


Рис. 2. Хронологический график сумм осадков за ноябрь по метеостанции Новый Порт

В результате проведенного анализа можно сделать вывод, что выявленная нестационарность осадков обусловлена не изменением климата, а особенностями инструментальных наблюдений, связанными со сменой регистрирующих приборов. После приведения рядов к однородным условиям последнего полупериода, многолетние ряды осадков становятся однородными.

Еще одной важной в практическом отношении метеорологической характеристикой являются наибольшие в году суточные осадки. При проверке по статистическим критериям получено, что для многолетних рядов максимальных в году суточных осадков гипотезы однородности распределений и стационарности средних и дисперсий приняты практически во всех случаях. Исключением является нестационарность дисперсий на метеостанции Диксон (рис. 3), которая обусловлена одним экстремальным максимумом (1954 г.), и на метеостанции Сургут, где она обусловлена несколькими максимумами осадков в первую половину ряда.

В связи с тем, что нестационарность за счет потепления климата пока практически не проявляется в рассматриваемом районе, а неоднородность из-за смены регистрирующих приборов может быть устранена, было осуществлено статистическое пространственно-временное моделирование осадков. Получение подобной модели позволяет определить осадки в любой точке территории при отсутствии наблюдений, что важно при строительном проектировании. На основе многолетних рядов сумм месячных осадков были получены параметры их распределений (среднее значение и коэффициент вариации) и расчетные значения 1 %-ной обеспеченности. Средние многолетние внутригодовые распределения месячных сумм осадков для метеостанций на территории Ямало-Ненецкого автономного округа (ЯНАО) приведены на рис. 4. Как следует из рис. 4, средние внутригодовые распределения осадков имеют максимум в июле – августе. Также имеет место и некоторая пространственная закономерность в амплитуде

годового хода осадков: на севере у побережья она несколько меньше и составляет 40 мм, а на юге региона несколько больше – до 50 мм, причем максимальные летние осадки на юге больше и составляют 65–70 мм, а на севере 55–60 мм.

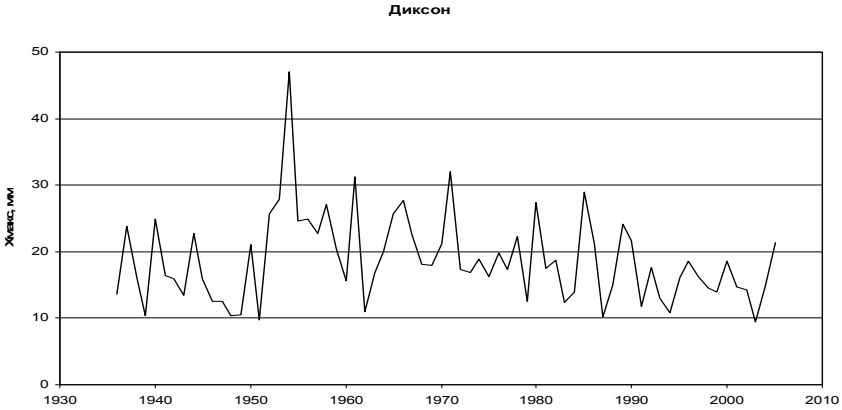


Рис. 3. Нестационарный по дисперсиям ряд максимальных суточных осадков на метеостанции Диксон

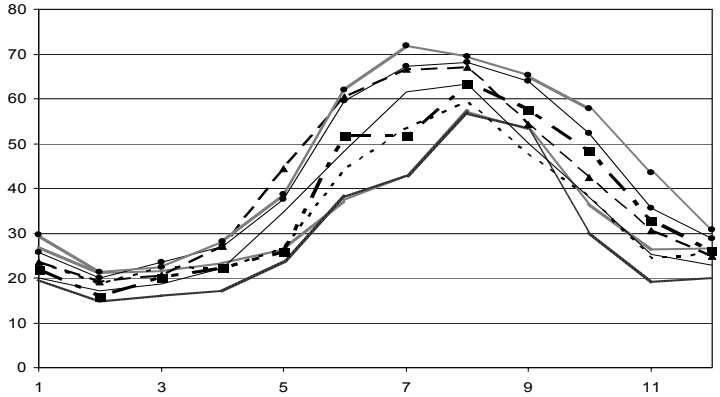


Рис. 4. Средние многолетние распределения месячных сумм осадков на метеостанциях ЯНАО

Анализ внутригодовой изменчивости коэффициентов вариации (Cv) показал, что для трех северных станций (Мыс Каменный, Новый Порт и Тазовское) наблюдается их некоторый внутригодовой ход с минимумом изменчивости в августе–сентябре и с максимумом в зимние месяцы. Однако, эта внутригодовая закономерность обусловлена инструментальной неоднородностью измерения осадков. После исключения неоднородных рядов, годовой ход в коэффициентах вариации, отсутствует и его среднее значение для территории ЯНАО можно принять равным 0,5 как для всех месяцев, так и для всех метеостанций. Отношение Cs/Cv (Cs – коэффициент асимметрии) варьирует как по территории, так и от месяца к месяцу от 1,0 до 5,0, но если также исключить неоднородные ситуации, то отношение Cs/Cv в среднем составляет 3–4.

Еще одной важной климатической характеристикой являются пространственно-временные распределения расчетных 1 %-ных сумм месячных осадков. Так же как и средние многолетние осадки, расчетные 1 %-ные имеют внутригодовой ход с максимумом в июле. Каких-либо пространственных закономерностей в параметрах внутригодовой изменчивости не наблюдается и поэтому в качестве расчетного внутригодового распределения осадков 1 %-ной обеспеченности для территории ЯНАО можно считать верхнюю огибающую всех внутригодовых графиков. Наибольшее значение 1 %-ных месячных осадков имеет место в июле и составляет 225 мм, а наименьшие – в зимние месяцы и равны 100–120 мм.

Для суточных максимумов осадков также были определены параметры распределений и расчетные максимальные суточные осадки 1 %-ной обеспеченности (табл. 1). При этом, приведение рядов наблюдений к многолетнему периоду не дало положительных результатов из-за низкой пространственной связанности максимальных осадков.

Таблица 1

Параметры распределений и 1 %-ные расчетные максимальные суточные осадки ($X_{1\%}$)

Код станции	Название станции	Параметры распределения			$X_{1\%}$, мм
		Среднее, мм	Cv	Cs/Cv	
20674	Остров Диксон	18,7	0,40	4,0	43,2
23146	Мыс Каменный	24,4	0,53	5,0	71,1
23631	Березово	29,9	0,40	5,0	71,2
23724	Ханты-Мансийск	29,8	0,36	5,0	66,2
23849	Сургут	29,9	0,42	5,0	73,6
23933	Няксимволь	30,3	0,42	5,0	74,6
23955	Александровское	31,4	0,40	5,0	74,8

Если исключить из рассмотрения аномальные осадки на метеостанции Диксон, то средние по территории 1 %-ные максимальные осадки составляют 72 мм, а их пространственная изменчивость незначительна. Значение 1 %-ных максимальных суточных осадков равное 72 мм можно рекомендовать как вероятностный максимум. При этом региональное отношение наибольших месячных осадков к наибольшим суточным составляет 3.1.

Таким образом, проведенный анализ свидетельствует, что проявления глобального потепления на севере Западной Сибири пока не наблюдаются, но вместе с тем необходим постоянный мониторинг динамики климатических показателей, наиболее важных для развития экономики данного региона.

Литература

1. *Закс Л.* Статистическое оценивание. – М.: Статистика, 1976. – 598 с.
2. Рекомендации по статистическим методам анализа однородности пространственно-временных колебаний речного стока. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 78 с.
3. *Gordon C., Cooper C., Senior C.A., Banks H., Gregory J.M., Johns T.C., Mitchell J.F.B., Wood R.A.* (2000). The simulation of SST, sea ice extents and ocean heat transports in a version of the Hadley Centre coupled model without flux adjustments.Climate Dynamics 16: 147 – 168.

Аль-Бухайри Осама Ахмед, Н.П. Смирнов

СЕЗОННЫЕ И МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА В РЕСПУБЛИКЕ ЙЕМЕН И ЮЖНОЙ ЧАСТИ АРАВИЙСКОГО ПОЛУОСТРОВА В XX И НАЧАЛЕ XXI ВЕКА

Al-Buhairi Osama Ahmed, N.P. Smirnov

SEASONAL AND LONG-TERM CHANGES OF TEMPERATURE IN THE REPUBLIC OF YEMEN AND THE SOUTHERN ARABIA XX–XXI CENTURY

В статье проанализированы изменения температурного режима в Йемене и в целом на Аравийском полуострове за последнее столетие. Показало, что изменения температуры воздуха не были однородными по территории полуострова, наблюдались разнонаправленные тенденции, в их изменении определяющими фактором изменения температурного режима являются изменения в характере циркуляции атмосферы Атлантическом региона Северного полушария и в Индоокеанском спектре Южного полушария.

Ключевые слова: температура воздуха, Северо-Атлантическое колебание, Индоокеанский антициклон, изменения климата, циркуляция атмосферы,

The changes of temperature regime in Yemen and arable peninsula in recent 100 year is studied. Results observed show that changes of air temperature is not homogeneous in the territory of Arabia peninsula. the main factor giving raise to changes in temperature regime is connected to changes in the regime of atmospheric circulation in over the pacific ocean(in the northern hemisphere)and Indian ocean.

Key words: Air temperature, North-Atlantic Oscillation, Indian Ocean anticyclone. Climate change, atmosphere circulation.

Изменения климатических условий в районе Аравийского полуострова на фоне изменяющегося климата в других районах планеты по непонятным причинам не нашли своего отражения за редким исключением [Аль-Бухайри, 2006] в научных исследованиях. Хотя район этот представляет несомненный интерес, поскольку расположен между двумя океанами Атлантическим и Индийским и, по-видимому, должен испытывать влияние циркуляции атмосферы как в системе Атлантического, так и Индийского океанов.

Особый интерес представляет исследование влияния Атлантики на изменения климата в этом регионе, поскольку это влияние, как показали последние исследования [Аль-Бухайри, 2006; Смирнов, 1998], сказывается не только в средних и высоких широтах большей части Северного полушария, но и заметно в Южном полушарии [Воробьев, 2003].

Кроме того, на фоне сложившегося мнения о “глобальном потеплении” интересно проанализировать, как оно проявляется в области расположенной между северным тропиком и экватором, с учётом того, что в Полярных регионах

планеты “глобальное потепление” не столь очевидно, как, казалось бы, должно было быть [Воробьев, 2003; Смирнов, 1998].

Для анализа сезонных и многолетних изменений температуры воздуха были использованы данные анализа температуры воздуха [http] в 7 точках (рис. 1), координаты которых приведены в табл. 1.

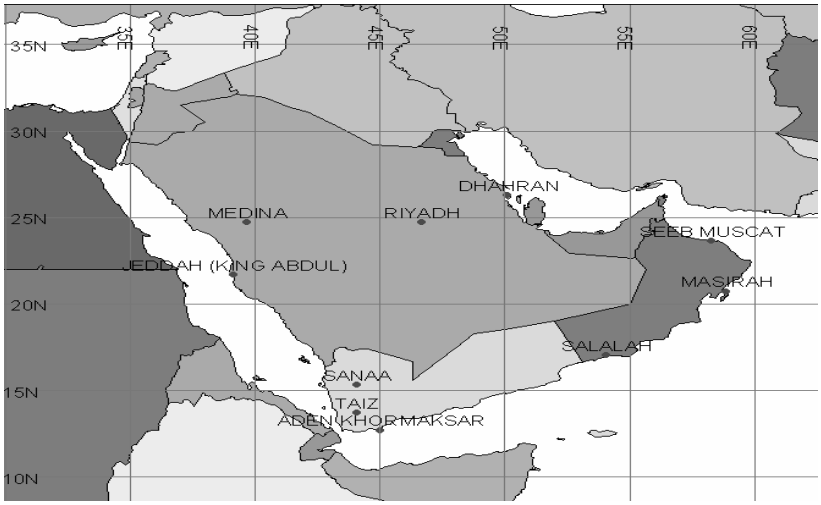


Рис. 1. Карта-схема Аравийского полуострова с указанием точек, в которых проведены температурные наблюдения

Таблица 1

Координаты точек, в которых анализировались изменения температуры воздуха

№ точки	Координаты		Временной интервал	Строка
	Широта, °с.ш.	Долгота, °в.д.		
1	15	50	С 1891 по 1996	Йемен
2	15	45	С 1848 по 2009	Йемен (Сана)
3	20	55	С 1848 по 2009	Оман
4	25	50	С 1891 по 1996	Саудовская Аравия (Дхахран)
5	25	40	С 1891 по 1996	Саудовская Аравия (Медина)
6	20	40	С 1891 по 1996	Саудовская Аравия
7	30	40	С 1891 по 1996	Саудовская Аравия

Точки выбирались с учётом наличия максимальной длины ряда наблюдений и нахождения их как в сухой, так и в более влажной частях полуострова, а также как на побережье, так и в более удалённых от берега районах.

В табл. 2 приведены статистические характеристики среднегодовых и среднесезонных значений температуры воздуха за рассматриваемые временные интервалы.

Изменения среднегодовой температуры на территории Аравийского полуострова невелики и варьируют в пределах от 25 до 28,5 °С. Минимальные значения температур варьируют от 24 до 27°С, а максимальные от 26 до 31 °С.

Размах колебаний среднегодовых значений температур за период более 100 лет составил от 1,5 °С в точке 6, до 4,2 в точке 2, т.е. различия между максимальными и минимальными значениями среднегодовых температур за последнее столетие на рассматриваемой территории также не велики. Есть все основания считать, что на Аравийском полуострове среднегодовые температуры воздуха в целом менялись незначительно.

Таблица 2

Статистические характеристики изменений температуры воздуха на Аравийском полуострове за рассматриваемые периоды

№ точки	Период осреднения	Среднее значение, °С	Минимальное значение, °С	Максимальное значение, °С	Размах колебаний, °С	Стандартное отклонение, σ
1	Год	27,7	26,7	28,9	2,2	1,4
	Зима	24,4	22,8	25,9	3,1	0,6
	Весна	27,8	26,9	29,8	2,9	0,5
	Лето	30,3	28,8	31,9	3,1	0,5
	Осень	28,1	26,5	29,6	3,1	0,7
2	Год	28,4	26,5	30,7	4,2	1,1
	Зима	22,1	19,9	24,2	4,3	1,1
	Весна	29,0	24,9	31,5	6,6	1,3
	Лето	34,9	29,2	38,4	9,2	1,5
	Осень	27,5	24,3	31,5	7,2	2,2
3	Год	26,7	25,0	28,0	3,0	0,7
	Зима	19,1	17,3	20,6	3,2	0,7
	Весна	28,0	26,4	29,4	3,0	0,8
	Лето	32,9	29,7	35,7	6,0	1,4
	Осень	26,9	25,4	28,3	2,8	0,7
4	Год	26,5	25,1	28,3	3,2	0,6
	Зима	18,1	16,1	20,1	4,0	0,8
	Весна	25,6	23,8	28,7	4,9	0,9
	Лето	34,0	32,5	36,4	3,9	0,8
	Осень	28,3	26,8	30,6	3,8	0,7
5	Год	27,3	26,0	30,1	4,1	0,8
	Зима	19,8	17,3	23,3	6,0	1,0
	Весна	27,0	25,3	30,0	4,7	0,9
	Лето	34,0	32,4	37,7	5,3	0,9
	Осень	28,3	26,3	31,1	4,8	1,1
6	Год	28,5	27,8	29,3	1,5	0,4
	Зима	24,9	23,1	26,7	3,6	0,7
	Весна	27,5	26,1	29,4	3,3	0,7
	Лето	32,0	30,4	33,3	2,9	0,5
	Осень	29,5	28,0	30,8	2,8	0,5
7	Год	25,1	23,9	26,4	2,5	0,5
	Зима	14,5	11,8	17,0	5,2	1,1
	Весна	24,9	22,8	26,6	3,8	0,8
	Лето	34,6	33,3	36,3	3,0	0,6
	Осень	26,3	24,4	28,0	3,6	0,7

Если брать средние значения температуры воздуха за отдельные сезоны, то различие между максимальными и минимальными значениями здесь значительно больше. Самые большие различия в зимний период наблюдаются в северном регионе (более 5 °С), а самые большие различия в летний и переходные сезоны характерны для юго-западной части Аравийского полуострова в горных районах (до 9 °С).

Зимой наиболее холодно на севере региона, а летом несколько ниже температуры на побережье. Прибрежные территории характеризуются и наиболее устойчивым температурным режимом в течение года (точки 1, 6).

Рассмотрим теперь, как менялись температурные условия на Аравийском полуострове во времени. Если рассматривать средние значения температуры воздуха за отдельные десятилетия (табл. 3), то можно отметить следующее. Первая половина прошлого столетия была тёплой на юго-западе полуострова (т. 1, 2 и 6). В то же время на самом юго-востоке эти годы были более холодными (т. 2). Заметно похолодало в 70–80-е годы прошлого столетия и на юге полуострова (т. 1), температура воздуха здесь были ниже температур, которые наблюдались в начале прошлого века. Самым холодным десятилетием на севере полуострова (т. 7) были в 80-е годы, а на побережье Аденского залива (т. 1) были годы 1970–1979 (т. 1). В горах на юго-западе (т. 2) самыми холодными были 90-е годы прошлого столетия.

Таблица 3

Средние за год значения температуры воздуха в различных точках Аравийского полуострова за отдельные десятилетия XX и XXI столетия

Годы	Точки						
	1	2	3	4	5	6	7
1900–1909	27,5	–	–	26,1	26,7	28,2	24,9
1910–1919	27,6	–	–	26,0	26,7	28,2	24,9
1920–1929	27,8	–	–	26,3	27,1	28,5	25,2
1930–1939	28,0	–	–	26,3	27,3	28,9	25,3
1940–1949	27,9	–	–	26,3	26,8	28,2	25,0
1950–1959	27,7	29,7	25,7	26,5	27,1	28,3	25,3
1960–1969	27,9	29,1	26,8	27,1	27,3	28,5	25,6
1970–1979	27,1	28,8	26,9	26,9	28,3	28,5	25,2
1980–1989	27,2	27,8	26,9	27,2	28,3	28,8	24,8
1990–1999	28,3	27,6	26,7	27,6	28,2	28,8	25,8
2000–2009	–	27,8	27,4	–	–	–	–

Самыми жарким десятилетием на севере полуострова (т. 7) были 60-е годы прошлого столетия, а на побережье Красного моря (т. 6) – 30-е годы, а на побережье Аденского залива самым жарким десятилетием было первое десятилетие XXI в, а на побережье Красного моря (т. 6) 30-е годы и конец XX столетия.

Таким образом, табл. 3 наглядно демонстрирует, что даже на относительно небольшом пространстве Аравийского полуострова изменения температуры воздуха были достаточно неоднородными за последние 50–100 лет.

Если рассматривать линейные тренды (табл. 4 и рис. 2 и 3), то можно прийти к следующим выводам.

Таблица 4

Линейные тренды и стандартные отклонения изменений температуры воздуха в различных точках Аравийского полуострова, рассчитанные за последние 50 лет

Точки	Среднегодовые значения, °С		Зимние значения, °С		Летние значения, °С	
	t	σ	*t*	σ	*t*	σ
1	–0,05	0,41	0,18	0,56	0,15	0,53
2	–2,05	1,14	–1,43	1,06	–0,28	1,46
3	1,16	0,7	–0,36	0,71	2,97	1,40
4	0,76	0,63	0,32	0,8	0,98	0,82
5	0,90	0,83	0,72	1,03	0,96	0,93
6	0,18	0,39	0,22	0,65	0,44	0,51
7	0,23	0,54	0,02	1,05	0,31	0,59

Наиболее повысились среднегодовые значения температуры воздуха за последние 50 лет прошлого столетия в центральной части Аравийского полуострова (т. 4, т. 5). При этом повышение характерно для всех сезонов, однако слабее всего это повышение коснулось зимнего сезона. Так, для т. 4 повышение температуры воздуха в зимний период не значимо.

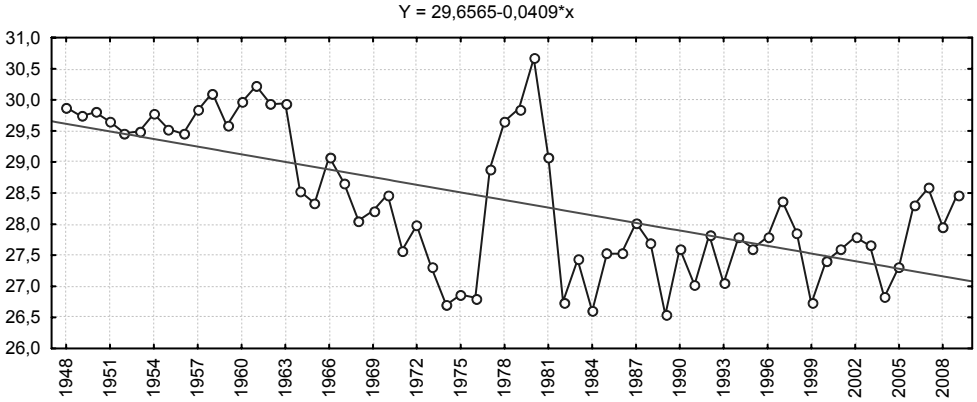
Заметно повысилась температура воздуха за последние 50 лет и в т. 3. Особенно заметно это проявилось в повышении летних температур. Что касается зимних температур, то в этот сезон в этом регионе наметилась хоть и слабая (не значимая) тенденция к понижению температуры.

В противоположность трём предыдущим точкам, в горном районе Йемена наметилась заметное похолодание. Особенно сильно оно выразилось осенью (–5,05 °С) и очень слабо в летний период, когда оно не значимо.

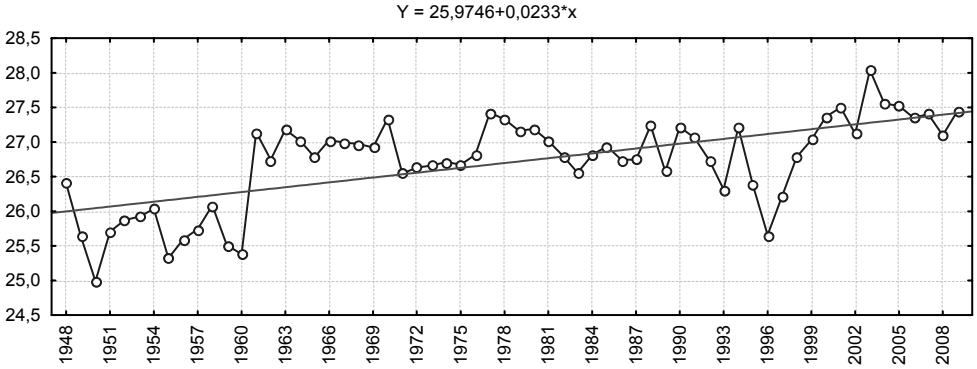
В точках 1, 6 и 7 значимых трендов не наблюдалось. Очень слабые тенденции, при этом разнонаправленные в различные сезоны, не превосходили 0,2–0,3 °С.

Таким образом, изменения температуры воздуха на Аравийском полуострове на основе анализа трендов, ещё раз подтверждает отсутствие направленных изменений температуры воздуха во второй половине XX столетия. В центральной части полуострова (в районах активной добычи нефти) и на юго-востоке наблюдалось повышение температур воздуха. На юго-западе, в горных районах – её понижение. В прибрежных районах и на севере полуострова температуа воздуха заметно не изменилась. Этот результат не свидетельствует в поддержку глобального потепления на Земле в последние 50 лет.

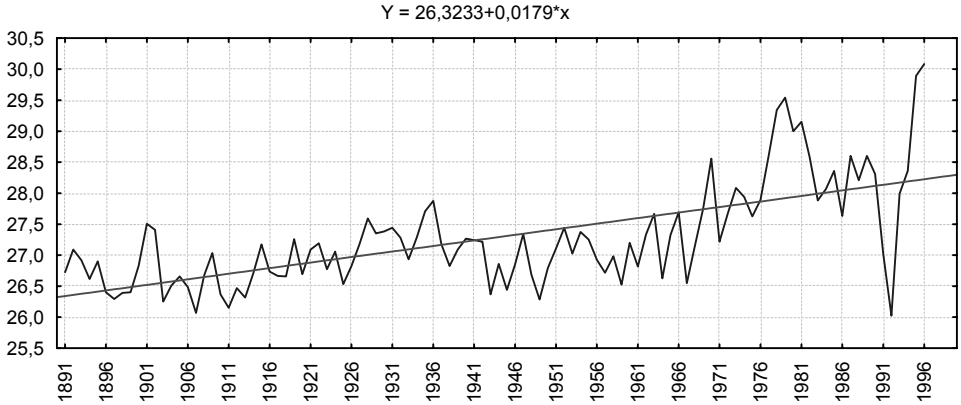
Структура многолетней изменчивости температуры воздуха на Аравийском полуострове исследовалась с использованием спектрального анализа и также оказалась различающейся в различных точках полуострова. На рис. 4 в качестве



а

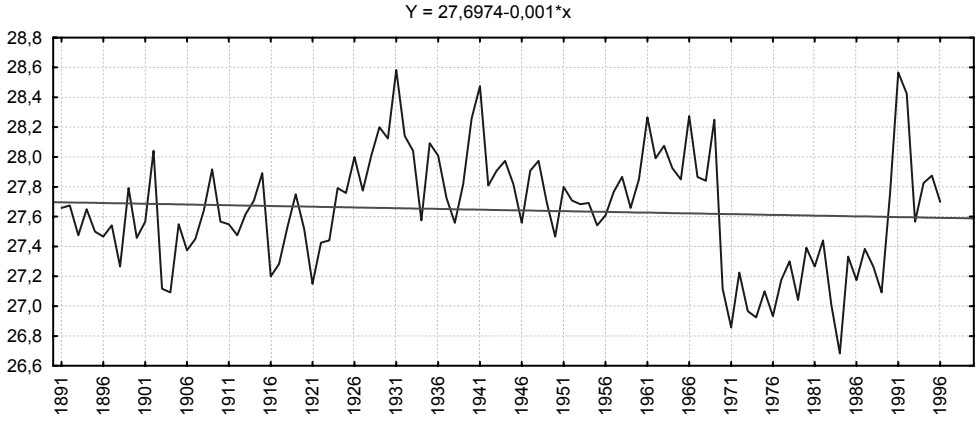


б

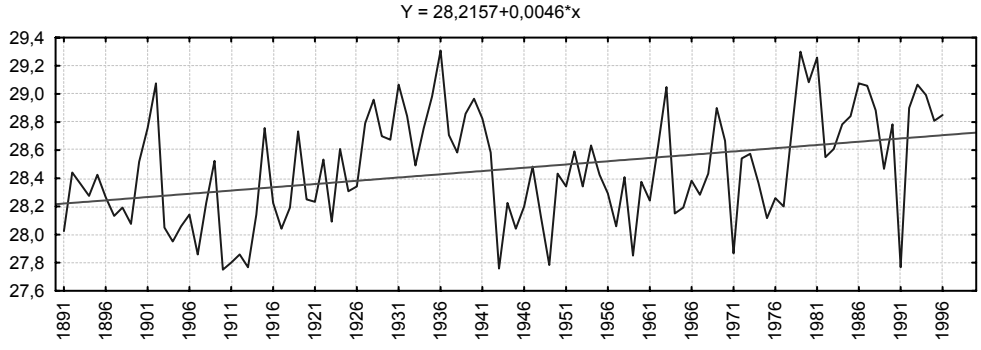


в

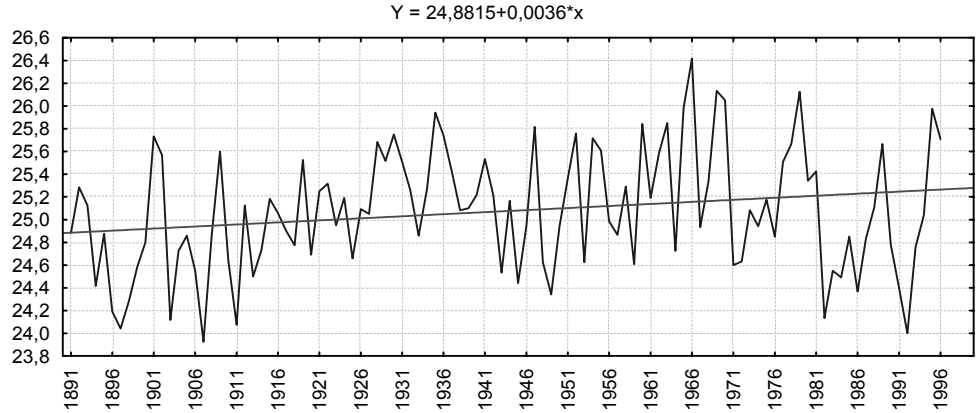
Рис. 2. Линейные тренды изменения среднегодовых значений температуры воздуха для точек 2 (*а*) 3 (*б*), 5 (*в*)



а

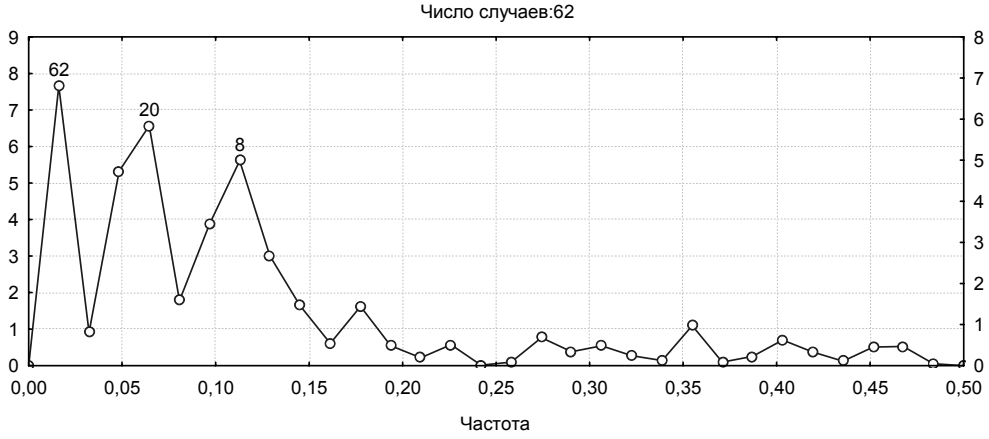


б

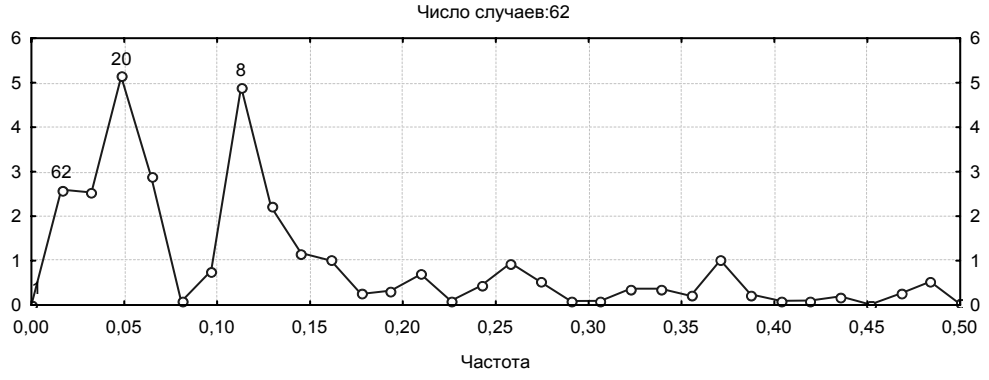


в

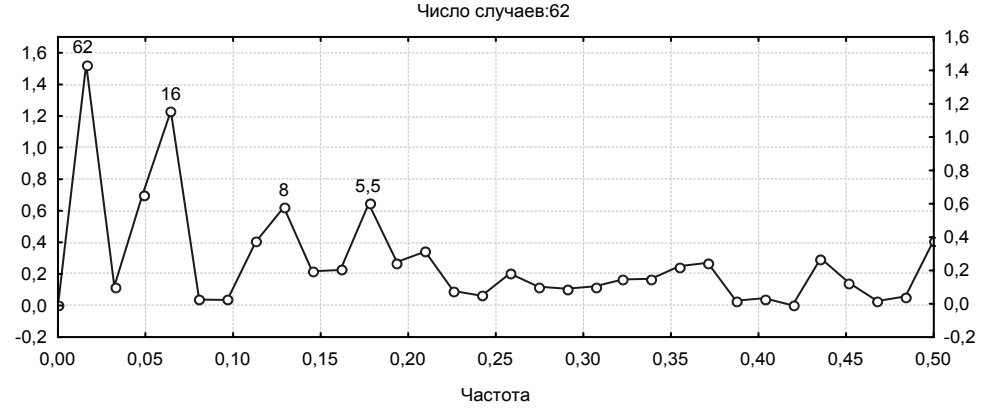
Рис. 3. Линейные тренды изменения среднегодовых значений температуры воздуха для точек 1(*а*), 6 (*б*), 7 (*в*)



а



б



в

Рис. 4. Спектры многолетней изменчивости среднегодовой температуры воздуха в точке 2(*а*), 5(*б*), 6(*в*)

примера приведены спектры изменений температуры воздуха в среднем за год в точках. Видно, что в т. 2, 5 и 6 основными циклическими колебаниями, определяющими структуру изменчивости температуры воздуха, являются колебания с периодами около 60, 20 и 8 лет. В точке 6 заметно также колебание с периодом 8–9 лет и около 5 лет.

В точке 3, как и в первых трёх, очень заметны колебания с периодами около 60 и 20 лет, практически отсутствует колебание с периодом около 8 лет, но появляется колебание с периодом около 12 лет. В точках 4 и 7 самую большую амплитуду имеет колебание с периодом около 8,8 года и колебание с периодом около 30 лет. В точке 7 очень заметно также и колебание с периодом около 5 лет.

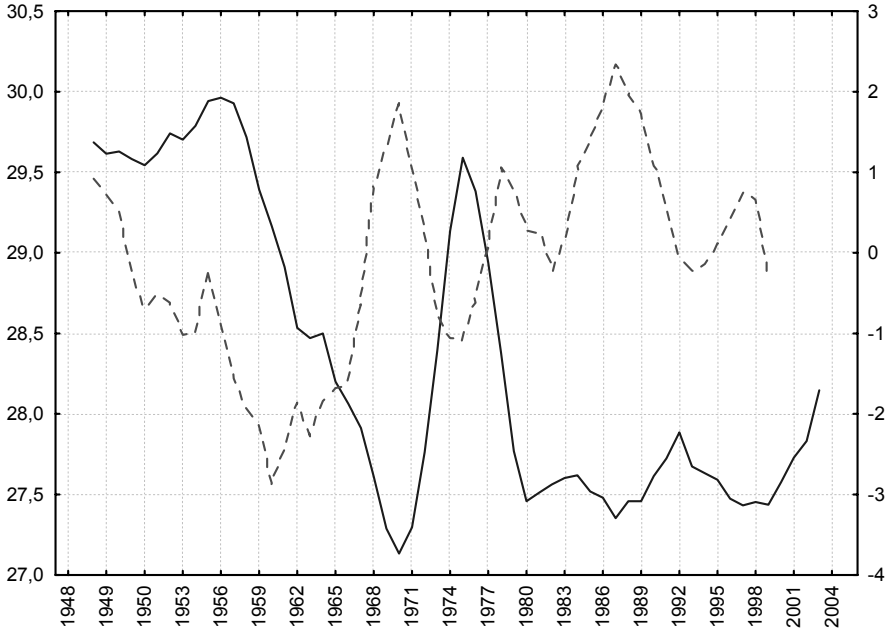
В целом же можно отметить, что в рассматриваемом регионе наиболее выражены колебания температуры с периодами около 8 лет, 20 и 60 лет. Интересно то, что такая структура изменчивости характерна для атмосферной циркуляции северо-атлантического региона нашей планеты. Индекс Северо-Атлантического колебания (NAO) имеет именно такую структуру многолетней изменчивости. [Аль-Мурейш, 2006]

В связи с этим были сопоставлены долгопериодные изменения температуры воздуха на Аравийском полуострове с изменениями индекса Северо-Атлантического колебания. На рис. 5 и 6 приведено сопоставление скользящих средних значений за пятилетку температуры воздуха в среднем за год и за зимний период и индекса Северо-Атлантического колебания для самой северной точки 7 и точки 2, расположенной на юге в горном районе. Коэффициенты корреляции для точки 2 составляют –0,62 (для среднегодовых значений) и –0,70 для зимних значений. Для точки 7 эти значения соответственно равны –0,60 и –0,73.

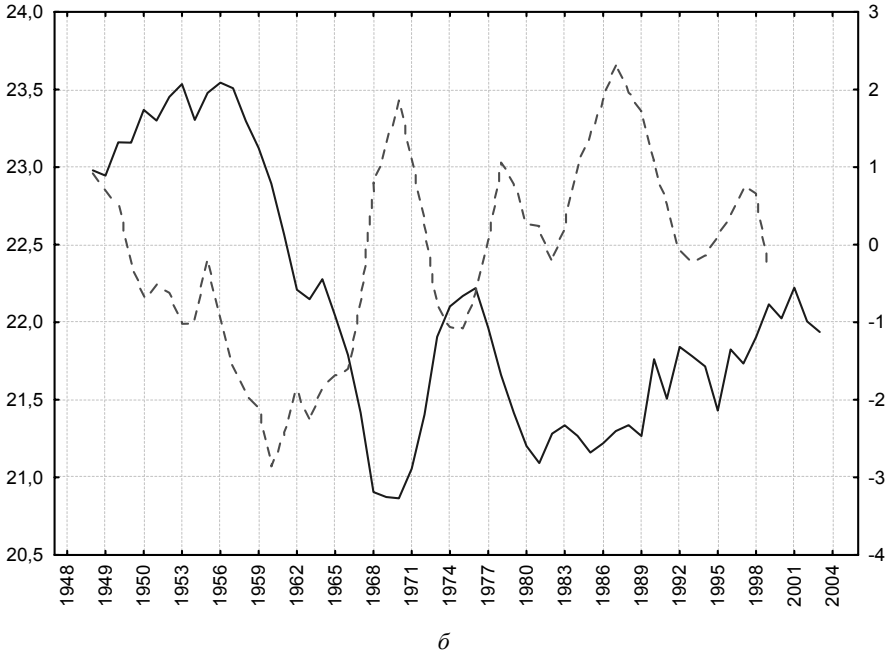
Для других точек коэффициенты корреляции между индексом NAO и температурой воздуха ниже, но, тем не менее, для зимних значений температуры они везде значимы. Это позволяет полагать, что определённое влияние на изменения температур воздуха на полуострове, особенно в зимний период оказывают атмосферные процессы над Северо-Атлантическим регионом северного полушария. Коэффициенты корреляции между температурой воздуха зимой и индексом NAO равны: –0,50 (т. 3), –0,62 (т. 4) и –0,49 (т. 6).

Можно предполагать, что на температуру воздуха, особенно на южном побережье Аравийского полуострова, может оказывать интенсивность и положение Индоокеанского антициклона. Такие расчёты были проделаны для точек 1, 2 и 3. Оказалось, что наблюдается значимая связь температуры воздуха с положением антициклона по широте и долготе и интенсивностью для точки 1, расположенной непосредственно на побережье Индийского океана, и точки 3, расположенной на юго-востоке.

Сопоставление температуры воздуха и давления в центре антициклона показывает, что с усилением интенсивности антициклона наблюдается и повышение температуры. Особенно это характерно для т. 3, т.е. для юго-восточной части Аравийского полуострова (рис. 7) На юго-западе это влияние заметно слабее.

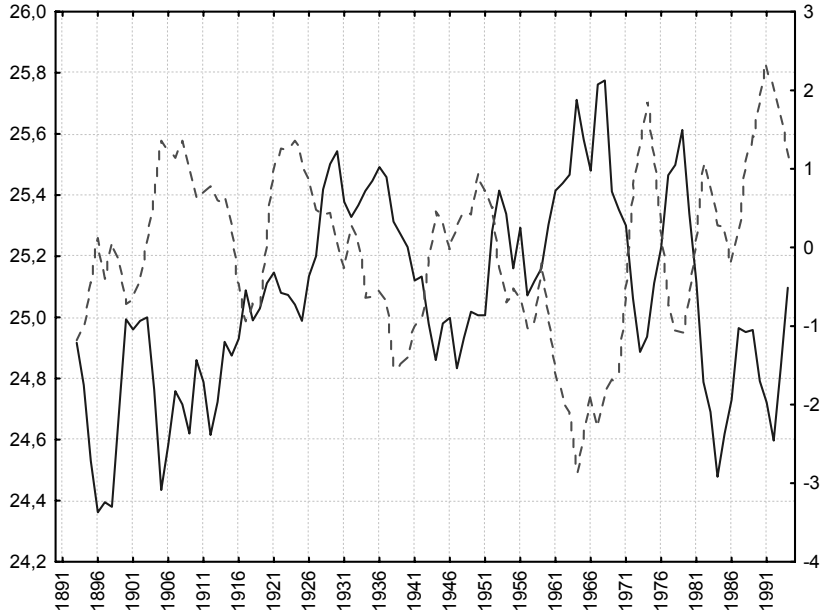


а

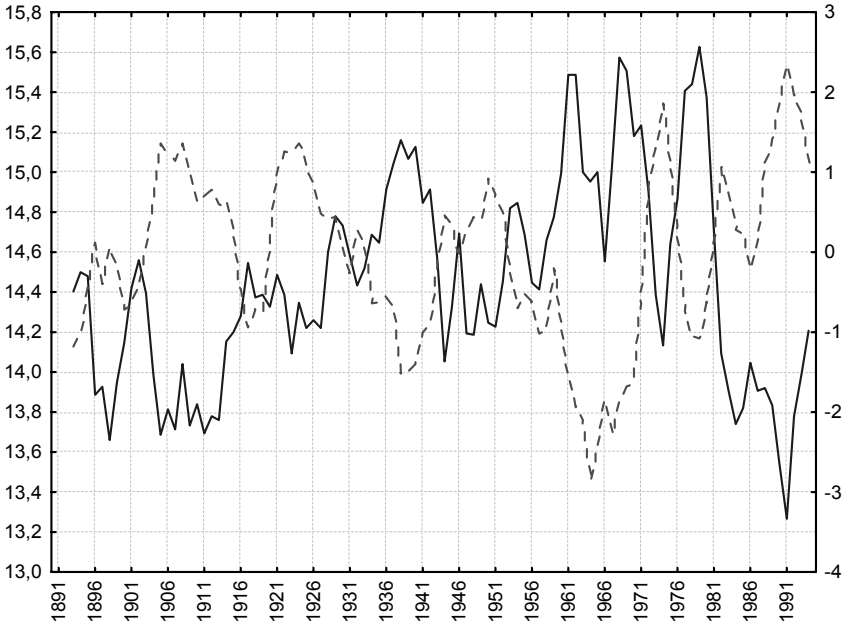


б

Рис. 5. Сопоставление пятилетних скользящих средних значений NAO (штриховая линия) и температуры воздуха T °C в точке 2 в среднем за год (*а*) и за зимний период (*б*)

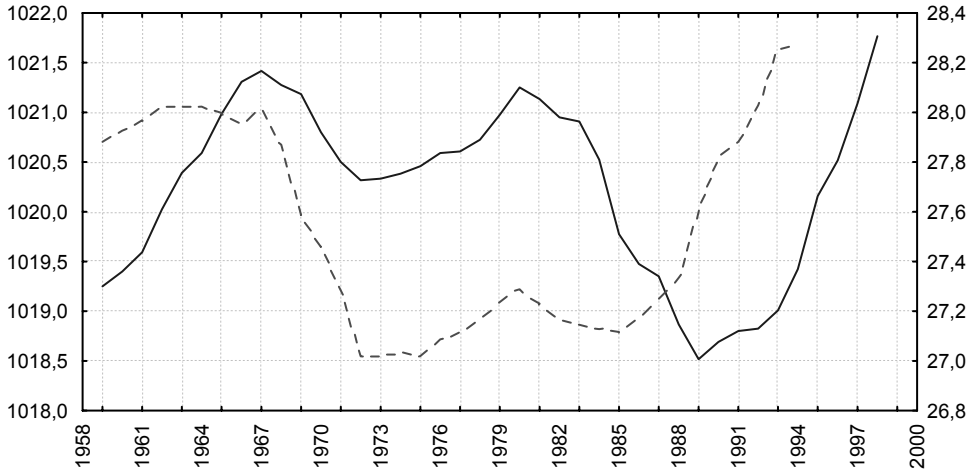


а

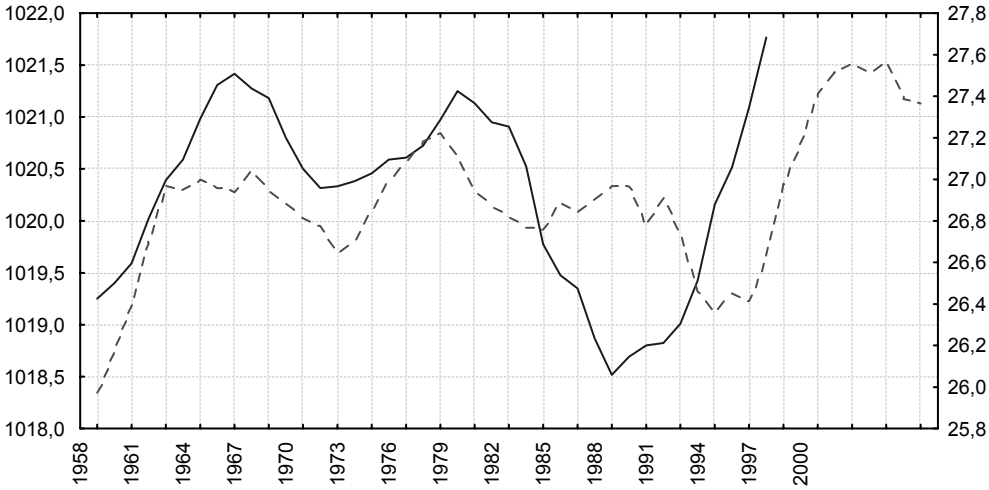


б

Рис. 6. Сопоставление пятилетних скользящих средних значений NAO (штриховая линия) и температура воздуха T °C в точке 7 в среднем за год (*а*) и за зимний период (*б*)



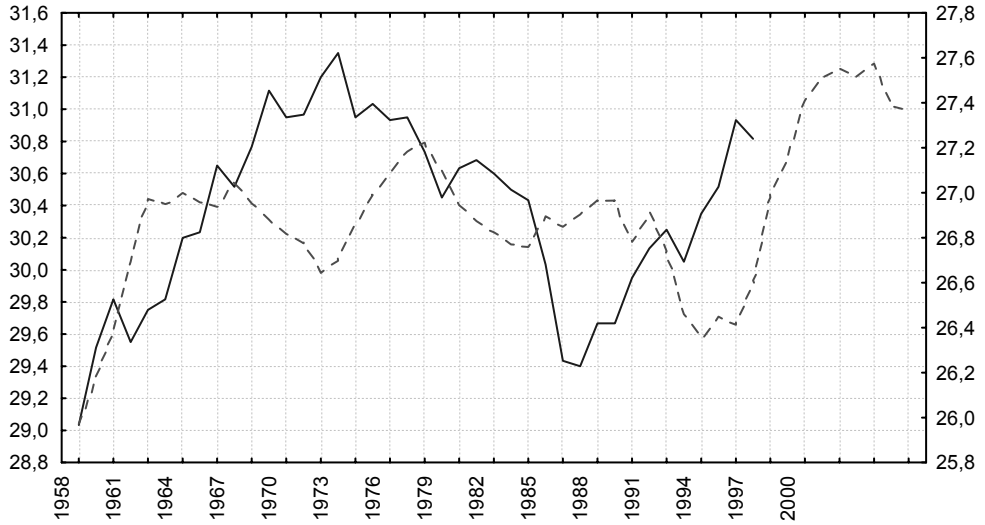
а



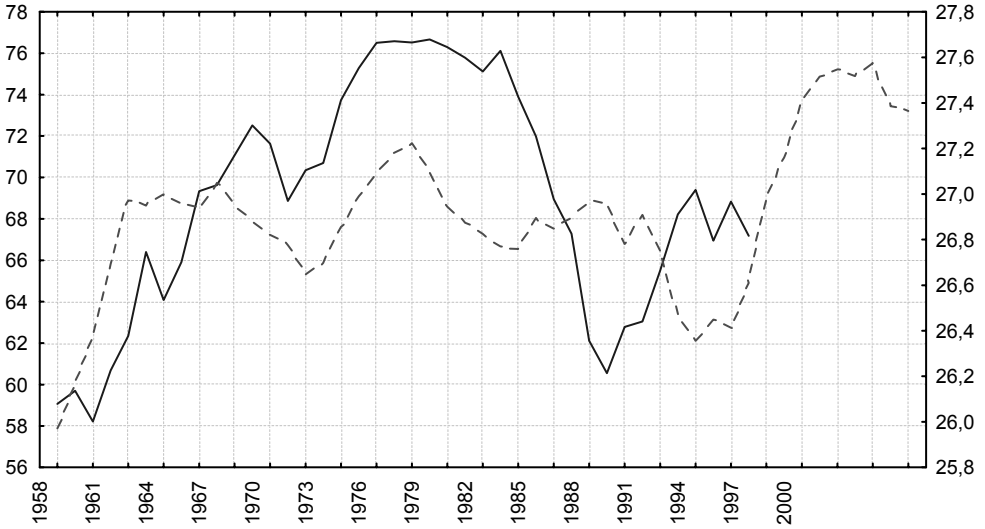
б

Рис. 7. Сопоставление среднегодовых значений температуры воздуха в т. 1(*а*) и 3(*б*) с изменениями давления в центре индоокеанского антициклона

На изменение температуры влияет также и положение антициклона. При увеличении широты и долготы центра антициклона, т.е. его удалении от Аравийского полуострова, имеет место уменьшение температур воздуха на юго-востоке Аравийского полуострова (рис. 8).



а



б

Рис. 8. Сопоставление среднегодовых значений температуры воздуха в т. 3 со среднегодовыми значениями широты (*а*) и долготы (*б*) центра Индоокеанского антициклона

Таким образом, из всего сказанного можно сделать следующее заключение:

– изменение температуры воздуха на Аравийском полуострове в течение прошлого столетия и начале текущего не было однородным – в каждой конкретной точке полуострова имело свои особенности;

– гипотеза о глобальном потеплении на основе данных об изменении температуры воздуха на Аравийском полуострове не подтверждается;

– многолетние колебания температуры воздуха определяются характером изменения циркуляции атмосферы в Северной Атлантике и северной части Индийского океана.

Литература

1. *Аль Мурейш Халед Абдо Саид Али, Фрумин Г.Т.* (2006) Проблемы водообеспечения в Республике Йемен // Тез. докл. Итоговой сессии ученого совета РГГМУ (25–26 января 2006 г.). – СПб.: изд. РГГМУ, с. 112–113.
2. *Воробьёв В.Н., Смирнов Н.П.* Арктический антициклон и динамика климата Северной Полярной области. – СПб.: изд. РГГМУ, 2003. – 81 с.
3. *Воробьёв В.Н., Саруханян Э.И., Смирнов Н.П.* “Глобальное потепление” – гипотеза или реальность? // Уч. зап. РГГМУ. 2005. № 1, с. 6–21.
4. *Воробьёв В.Н., Саруханян Э.И., Смирнов Н.П.* Сезонная изменчивость характеристик центров действия атмосферы Южного полушария // Уч. зап. РГГМУ. 2008. № 8, с. 47–61.
5. *Смирнов Н.П., Воробьёв В.Н., Кочанов С.Ю.* Северо-Атлантическое колебание и климат. – СПб.: изд. РГГМУ, 1998. – 121 с.
6. *Смирнов Н.П., Саруханян Э.И., Розанова И.В.* Циклонические центры действия Южного полушария и изменения климата. – СПб.: изд. РГГМУ, 2004. – 217 с.
7. http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP/.CPC/.GHCN_CAMS/.gridded/.deg0p5/

Е.М. Атласкин

ИССЛЕДОВАНИЕ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПРОГНОЗА ПОГОДЫ К ИЗМЕНЕНИЮ ФУНКЦИЙ СТРАТИФИКАЦИИ В БЛОКЕ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ

E.M. Atlaskin

SENSITIVITY STUDY OF A NUMERICAL WEATHER PREDICTION MODEL TO MODIFICATIONS OF STABILITY FUNCTIONS IN TURBULENCE PARAMETRIZATION SCHEME

Новые физически обоснованные формулировки коэффициентов турбулентной вязкости и турбулентной диффузии использованы применительно к устойчиво-стратифицированному потоку в гидродинамической модели прогноза погоды HIRLAM. На основе одномерной версии модели проведены численные эксперименты для единичного столба воздуха на основе данных эксперимента BASE и эталонных данных. Результаты экспериментов показали, что новая схема турбулентного замыкания точнее воспроизводит турбулентный режим пограничного слоя атмосферы, а также вертикальные профили температуры и скорости ветра. При высоком разрешении модели вертикальные профили, полученные на основе новой модели, практически полностью соответствую эталонным профилям.

Ключевые слова: пограничный слой атмосферы, турбулентное замыкание, устойчивая стратификация.

New theoretically justified formulations for the coefficients of eddy viscosity and eddy diffusivity developed for the parametrization of a stably stratified flow, were applied in the numerical weather prediction model HIRLAM. Experiments with the Single Column Model were performed using data obtained from BASE experiment and from reference data. Numerical experiments revealed that the new parametrization scheme reproduces the turbulent structure of the atmospheric boundary layer, as well as vertical profiles of temperature and wind speed, better than the basic turbulence closure scheme of the model. With high vertical resolution, the profiles, calculated by the new model, are nearly the same as the corresponding reference profiles.

Keywords: atmospheric boundary layer, turbulence closure, stable stratification.

Замыкание системы уравнений в гидродинамических моделях прогноза погоды (ГМПП) применительно к холодному устойчиво-стратифицированному пограничному слою атмосферы (УПС) является нетривиальной задачей. Холодный УПС представляет собой температурно-инверсионный слой, образующийся в зимнее время в темное время суток в результате выхолаживания поверхности за счет излучения длинноволновой радиации. Основными условиями, при которых формируется УПС, являются: отсутствие облаков нижнего яруса, слабый ветер и отсутствие солнечной радиации. Турбулентные потоки в УПС характеризуется сильной анизотропией и чувствительностью к орографическим элементам местности. В зависимости от соотношения сил статической устойчиво-

сти и динамической неустойчивости в УПС могут наблюдаться такие процессы как внутренние гравитационные волны, прерывистая турбулентность, плотностные течения, а так же застаивание или схлопывание приземного слоя, описанные в литературе [Derbyshire, 1999; Sun et al., 2002; Бызова и др., 1989].

Замыкание системы уравнений в ГМПП основано на предположении о горизонтальной изотропии потока, при котором изменение горизонтального потока считается незначительным и не учитывается в моделях. Традиционно коэффициенты турбулентного обмена в моделях выражаются через параметр вертикальной стратификации слоя. Данная зависимость носит полуискусственный характер напр. [Lenderink and Holtslag, 2004] и определяется по-разному в зависимости от специфики модели. Актуальной является задача повышения качества прогноза погоды за счет более точного теоретически обоснованного, а также экспериментально подтвержденного приближения при интегрировании системы гидродинамических уравнений. Для решения задачи турбулентного замыкания для условий устойчивой стратификации в работе [Sukoriansky et al., 2005] построена спектральная модель Квази-нормального Исключения Масштаба Турбулентного возмущения (КИМТ). На основе данной модели в работе получены функции зависимости горизонтальных и вертикальных компонент турбулентной вязкости и турбулентной диффузии от стратификации. При этом при увеличении значения параметра стратификации уменьшаются значения вертикальных компонент потоков количества движения и тепла за счет турбулентной вязкости и диффузии, но увеличиваются значения их горизонтальных компонент.

Целями данной работы являются:

– модификация блока турбулентного замыкания в модели прогноза погоды «High Resolution Limited Area Model» (HIRLAM) с применением спектральных функций устойчивости (СФУ);

– исследование чувствительности модели к модификации блоков турбулентного замыкания в приземном и пограничном слоях атмосферы.

Исследование чувствительности модели к модификациям схем физических параметризаций выполнено с использованием одномерной версии модели HIRLAM для единичного столба воздуха на основе данных эксперимента ”The Beaufort Sea Arctic Stratus Experiment” (BASE) [Kosovic and Curry, 2000].

Базовая схема турбулентного замыкания модели HIRLAM

HIRLAM – региональная прогностическая система, включает в себя систему ассимиляции данных метеорологических наблюдений и гидродинамическую модель прогноза погоды, использующую гидростатическое приближение. Уравнения гидродинамики интегрируются на основе полунеявной схемы интегрирования по времени с использованием полу-Лагранжевого подхода. В модели используется расшатанная сетка С Аракавы по горизонтали и гибридная сигма-Р-система координат по вертикали. Подробное описание особенностей динамического ядра модели и блока физических параметризацией приведено в работе [Undén et al., 2002].

Схема замыкания для приземного слоя атмосферы

Турбулентные потоки количества движения, тепла и влаги вблизи поверхности в моделях традиционно рассчитываются на основе предположения о постоянстве вертикальных турбулентных потоков в слое между поверхностью и нижним модельным уровнем. Для параметризации турбулентного переноса в модели используется схема Льюиса, описанная в работе [Luis, 1979]. Вертикальные потоки в слое определяются на основе теории подобия Монина-Обухова, зависимости для них имеют следующую форму:

$$\overline{w'\gamma'} = C_\gamma \Delta\varphi \, |\vec{V}_N|, \tag{1}$$

где $\overline{w'\gamma'}$ – средний вертикальный кинематический поток свойства γ, которое в модели соответствует скорости ветра, температуре, удельной влажности, C_γ соответствует коэффициенту сопротивления потока количества движения (при γ = M) и коэффициентам вертикального переноса тепла (при γ = H) и влаги (при $\gamma = Q$), $\Delta\gamma$ – разница между значением параметра γ на нижнем модельном уровне и его значением на поверхности, $|\vec{V}_N|$ – скорость ветра на нижнем модельном уровне. Значения температуры и удельной влажности на поверхности расчитываются на основе уравнений баланса тепла и влаги, соответственно. Скорость ветра у поверхности принимается равной нулю. В модели используется следующее выражение для коэффициента переноса:

$$C_\gamma = C_{MN}\left(1 + \frac{\ln(z_{0M}/z_{0H})}{\ln(z/z_{0M})}\right)^{-1} \Psi_\gamma\left(Ri, \frac{z}{z_{0H}}, \frac{z}{z_{0M}}\right), \tag{2}$$

где z – высота на уровнем поверхности; z_{0M}, z_{0H} – параметры шероховатости для количества движения и температуры, соответственно; C_{MN} – коэффициент переноса количества движения применительно к нейтральной стратификации; Ri – число Ричардсона, функция Ψ_γ определена согласно работам [Luis, 1979; Luis, 1982]. В модели коэффициент переноса влаги равен коэффициенту переноса тепла, а параметр шероховатости для удельной влажности равен параметру шероховатости для температуры. Поэтому в дальнейшем обозначения для γ = Q опускаются. Считается, что при нейтральной стратификации $z_{0M} = z_{0H}$, а $\Psi_\gamma = 1$. Выражение для C_{MN} записывается следующим образом:

$$C_{MN} = \left(\frac{k}{\ln(z/z_{0M})}\right), \tag{3}$$

где $k \approx 0{,}4$ – постоянная Кармана. Для случая неустойчивой стратификации функция Ψ_γ имеет следующий вид:

$$\Psi_\gamma = 1 + \frac{a_{\gamma U} Ri}{1 + b_{\gamma U} C_{\gamma N} \left(Ri \frac{z}{z_{0M}} \right)^{1/2}}. \quad (4)$$

В выражении (4) коэффициенты a и b для количества движения, тепла и влаги определены соответственно: $a_{mU} = 10$, $b_{mU} = 75$, $a_{HU} = a_{QU} = 15$, $b_{HU} = b_{QU} = 75$. Число Ричардсона характеризует стратификацию потока в слое. Оно определяется как:

$$Ri = \frac{g}{\theta_v} \frac{d\theta_v}{dz} \Bigg/ \left(\frac{d|\vec{V}|}{dz} \right)^2, \quad (5)$$

где g – ускорение свободного падения, θ_v – виртуальная потенциальная температура, $d\theta_v/dz$, $d|\vec{V}|/dz$ – вертикальные градиенты виртуальной температуры и скорости ветра, соответственно. Для случая устойчивой стратификации функция Ψ_M для количества движения имеет вид:

$$\Psi_M = \frac{1}{1 + \frac{a_{MS} Ri}{\sqrt{1 + b_{MS} Ri}}}, \quad (6)$$

где $a_{MS} = 10$, $b_{MS} = 1$. Для определения потоков тепла и влаги функция Ψ_γ записывается следующим образом:

$$\Psi_\gamma = \frac{1}{1 + a_{\gamma S} Ri \sqrt{1 + b_{\gamma S} Ri}}, \quad (7)$$

где $a_{HS} = a_{QS} = 10$, $b_{HS} = b_{QS} = 1$.

Схема замыкания для пограничного слоя атмосферы

Замыкание системы уравнений для пограничного слоя атмосферы в модели основано на решении прогностического уравнения для кинетической энергии турбулентности и диагностического уравнения для турбулентного пути смешения. Традиционно моменты первого порядка выражаются через коэффициент турбулентного обмена K_γ и градиент среднего значения прогностической скалярной величины γ, а именно

$$\overline{w'\gamma'} = K_\gamma \frac{d\gamma}{dz}. \quad (8)$$

Согласно теории подобия Монина-Обухова, коэффициент турбулентного обмена может быть выражен через масштаб турублентного возмущения и характеристическую скорость турбулентного потока. В модели HIRLAM используется распространенная формулировка [напр., Lenderink and Holtslag, 2004] для коэффициента K_γ:

$$K_\gamma = \phi l_\gamma \sqrt{E}\,, \tag{9}$$

где l_γ – длина пути смешения, $\phi = l_M / l_H$ – отношение пути смешения для количества движения l_M к пути смешения l_γ, E – кинетическая энергия турбулентности (КЭТ), $E = 0{,}5(\overline{u'u'} + \overline{v'v'} + \overline{w'w'})$. Для КЭТ решается прогностическое уравнение, в котором присутствуют моменты второго порядка [Cuxart et al., 2000]. Длина пути смешения l_γ объединяет в себе длину пути смешения для неустойчивой и близкой к нейтральной стратификации и длину пути смешения для устойчивой стратификации [Lendering and Holtslag, 2004]. Для неустойчивой и близкой к нейтральной стратификации длина пути смешения l_{int} рассчитывается на основе следующего выражения:

$$\frac{1}{l_{int}} = \frac{1}{l_{up}} + \frac{1}{l_{dw}}\,, \tag{10}$$

где l_{up} и l_{dw} – растояния, которые преодолевает частица воздуха, соответственно, при восходящем и нисходящем движениях в слое перемешивания. Значения l_{up} и l_{dw} вычисляются с использованием следующих выражений

$$l_{up} = \int_{z_{bottom}}^{z} F(Ri)dz'\,, \tag{11а}$$

$$l_{dw} = \int_{z}^{z_{top}} F(Ri)dz'\,, \tag{11б}$$

где $F(Ri)$ – функция от локального числа Ричардсона, z_{bottom}, z_{top} – нижняя и верхняя границы слоя турбулентного перемешивания, соответственно.

$F(Ri)$ имеет следующий вид:

$$F(Ri) = \alpha_n - \frac{2}{\pi}(\alpha_c - \alpha_n)(\alpha_r Ri)\,, \text{ при } Ri > 0 \tag{12а}$$

$$F(Ri) = \alpha_n - \frac{2}{\pi}(\alpha_c - \alpha_n)\arctan(\alpha_r Ri)\,, \text{ при } Ri \le 0 \tag{12б}$$

где $\alpha_n = c_n k$, $c_n \approx 0{,}5$, $\alpha_c = 3c_n k/Pr$; Pr – число Прандтля; α_r имеет следующий вид:

$$\alpha_r = \frac{\pi}{2}\frac{c_n k}{\alpha_c - c_n k}2b\,, \tag{13}$$

где $b = 4$. Используемая в этом методе функциональная зависимость от числа Ричардсона несет искусственный характер.

Длина пути смешения для устойчивой стратификации определяется на основе локальной устойчивости слоя и КЭТ, а именно

$$l_s = c_\gamma \frac{\sqrt{E}}{N}\,. \tag{14}$$

где коэффициент $c_\gamma = c_H = 0{,}2$ для потоков тепла и влаги, $c_\gamma = c_M$ для потока количества движения, c_M есть линейная функция от Ri, его максимальное значение составляет $c_M = 5c_H$, N – частота Брента-Вяйсяля. Зависимость c_M от Ri вводится для воспроизведения влияния стратификации на число Прандтля.

Длина пути смешения l_γ, используемая для вычисления вертикальных турбулентных потоков вычисляется на основе следующего выражения

$$\frac{1}{l_\gamma^2} = \frac{1}{l_{\text{int}}^2 + l_{\min}^2} + \frac{1}{l_s^2}, \tag{15}$$

где $l_s^{-1}=0$ при неустойчивой стратификации, l_{min} определена ниже, она вводится для того, чтобы избежать нереальных значений l_γ в случае сильно-устойчивой стратификации, при которой $l_{int}=0$. Выраженые для l_{min} имеет следующий вид:

$$\frac{1}{l_{\min}} = \frac{1}{l_\infty} + \frac{1}{0{,}5c_n kz}, \tag{16}$$

где $l_\infty = 75\exp(-z/500)$ при неустойчивой, нейтральной и слабо устойчивой стратификациии и $l_\infty = 3(Ri)\exp(-Ri^2)$ при сильно устойчивой стратификации.

Модификация схемы турбулентного замыкания с применением спектральных функций устойчивости

Замыкание системы уравнений в модели HIRLAM основано на предположении горизонтальной однородности потоков, что обусловлено грубым разрешением численной сетки модели. Поэтому при модификации схемы турбулентного замыкания рассматривался только вертикальный турбулентный обмен.

Модификация схемы замыкания для приземного слоя атмосферы

Выражения для коэффициентов переноса количества движения C_M и тепла C_H, полученные на основе модели КИМТ, имеют следующий вид [теория описана в Sukoriansky et al., 2005; формулировки получены от авторов в персональной переписке]:

$$C_M = \frac{k^2}{\Psi_M^2}, \tag{17а}$$

$$C_H = \frac{k^2}{\Psi_M \Psi_H}, \tag{17б}$$

где Ψ_M и Ψ_H – функции стратификации, соответственно, для количества движения и тепла. Они определены равными:

$$\Psi_M = \ln(\varsigma/\varsigma_0) + 2{,}25(\varsigma - \varsigma_0)(1 - 0{,}09\varsigma), \tag{18а}$$

$$\Psi_H = \mathrm{Pr}_0 \{\ln(\varsigma/\varsigma_0) + 2(\varsigma - \varsigma_0) \times \\ \times [1 + 1{,}022 + 0{,}07\varsigma(\varsigma^3 - 2.5\varsigma^2 + 2{,}5\varsigma - 1{,}25)]\}. \quad (18б)$$

В выражениях (18) Pr_0 – Число Прандля приминительно к нейтральному случаю, $\zeta = z/L$ – безразмерная функция стратификации в приземном слое; $\zeta_0 = z_0/L$ – безразмерная функция стратификации ниже уровня шероховатости; z_0 – параметр шероховатости для количества движения; L – масштаб Монина-Обухова. В качестве параметра стратификации в модели HIRLAM используется Ri, поэтому для применения данной схемы в модели параметр ζ был выражен через Ri. Это соотношение получено на основе формулировок Монина-Обухова для безразмерных функций устойчивости, применяемых для параметризации турбулентных потоков в приземном слое [напр., Бызова и др., 1989]. Оно имеет следующий вид

$$\varsigma = \frac{\alpha_H}{\alpha_M^2} Ri, \quad (19)$$

где $\alpha_M = K_M/K_N$ и $\alpha_H = K_H/K_N$ есть, соответственно, отношения коэффициентов турбулентной вязкости K_M и диффузии K_H к коэффициенту турбулентной вязкости в нейтральном случае K_N. Выражения для этих коэффициентов имеют следующий вид:

$$\alpha_M = \frac{1 + 8Ri^2}{1 + 2{,}3Ri + 35Ri^2}, \quad (20а)$$

$$\alpha_H = \frac{1{,}4 - 0{,}01Ri + 1{,}29Ri^2}{1 + 2{,}44Ri + 19{,}8Ri^2}. \quad (20б)$$

Данные коэффициенты рассчитаны на основе интегрирования спектральной модели КИМТ от значения волнового числа, соответствующего обратной величине масштаба диссипации энергии, или так называемого масштаба Колмогорова, до значений волнового числа, соответствующих обратной величине характерного масштаба численной сетки ГМПП. Поскольку функции α_M и α_H, характеризующие стратификацию слоя, выведены на основе спектральной модели, они названы спектральными функциями устойчивости.

Модификация схемы турбулентного замыкания для пограничного слоя атмосферы

Модифицированная схема турбулентного замыкания для пограничного слоя атмосферы также основана на использовании прогностического уравнения для КЭТ и диагностического уравнения для пути турбулентного смешения. Выражение для коэффициентов турбулентной вязкости и диффузии имеет следующий вид:

$$K_{M,H} = c_0 \alpha_{M,H} l \sqrt{E}, \quad (21)$$

где $c_{0,}$ = 0,55. Путь смешения l в выражении (21) рассчитывается на основе пути смешения для нейтрального случая и для устойчивого случая, а именно

$$\frac{1}{l} = \frac{1}{l_b} + \frac{1}{l_s}, \tag{22}$$

где l_b – путь смешения при нейтральной стратификации; l_s – путь смешения в устойчиво-стратифицированном слое, определяемый соотношением (14), в котором принимается $c_M = c_H = 0{,}75$ независимо от стратификации. Путь смешения при нейтральной стратификации определяется в работе [Blackadar and Tennekes, 1968] на основе теории подобия Монина-Обухова как:

$$l_b = \frac{kz}{1 + \frac{kzf}{Bu_*}}. \tag{23}$$

Здесь f – параметр Кориолиса, u_* – динамическая скорость; B = 0,0063.

Функции α_M и α_H вычисляются на каждом уровне модели. Данная формулировка освобождает от необходимости двойного вертикального интегрирования, что значительно сокращает время работы схемы.

Одномерные численные эксперименты для единичного столба воздуха на основе данных эксперимента BASE

Для тестирования схемы турбулентного замыкания с применением СФУ использовалась одномерная модель HIRLAM. Одномерная модель рассчитывает эволюцию крупномасштабных физических характеристик, таких как температура, влажность, компоненты скорости ветра, и т.д., в единичном столбе воздуха при заданных значениях горизонтальной и вертикальной адвекции. Задаваемые параметры называются управляющими параметрами, их значения могут определяться на основе данных измерений. Целью использования одномерных моделей является исследование чувствительности и оценка точности модели к модификациям схем физических параметризаций вертикальных подсеточных процессов.

Для численых экспериментов с моделью использовались данные эксперимента BASE. Эксперимент проводился с 19 сентября по 29 октября 1994 г. надо льдом в море Бофорта в районе точки с координатами 73 с.ш., 133 з.д., главной целью его являлось исследование арктической циркуляции в осенний период. В результате эксперимента были собраны данные о вертикальных профилях температуры и скорости ветра. Подробное описание эксперимента приведено в [Kosovic and Curry, 2000]. В дальнейшем использовались данные измерений за 1 октября, когда наблюдалось формирование устойчивого пограничного слоя над морским льдом, а также отсутствовала облачность. В дальнейшем данные

измерений эксперимента BASE сравнивались с результатами моделей, разрешающих мелкомасштабную турбулентность, так называемых моделей Large Eddy Simulation (LES) [Kosovic and Curry, 2000; Stoll and Porte-Agel, 2008]. В результате сравнения были получены эталонные профили температуры и скорости ветра, которые рекомендованы для использования при тестировании схем параметризаций турбулентного замыкания. В настоящей работе в качестве эталонных профилей использовались профили, полученные в работе [Stoll and Porte-Agel, 2008].

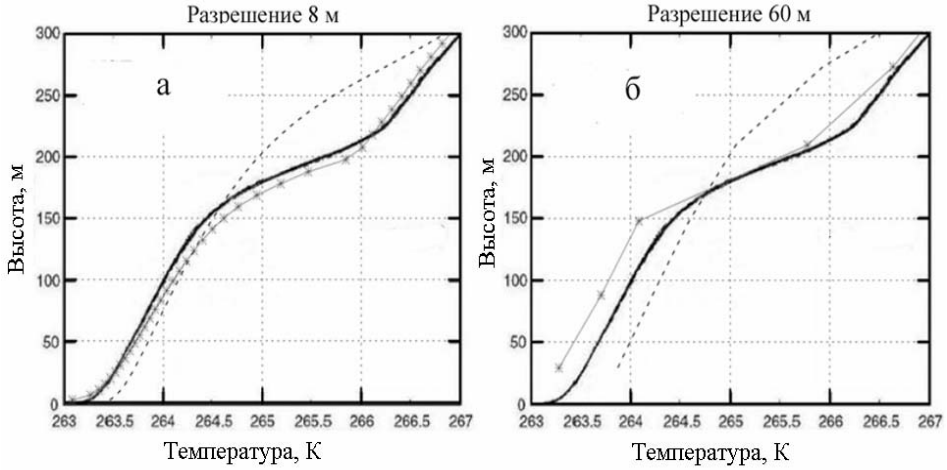
Параметры численных экспериментов в настоящей работе соответствуют параметрам экспериментов в работе [Cuxart et al., 2006], посвященной тестированию схем параметризации турбулентности национальных метеорологических центров. Высота области интегрирования по вертикали для температуры составляет 400 м, а для скорости ветра – 250 м от уровня поверхности. Длина численного эксперимента составляет 9 ч. Граничные условия для скорости ветра: на верхней границе ветер известен из измерений, постоянен и равен геострофическому. Компоненты скорости ветра в данном слое равны $u_g = 8$ м/с, $v_g = 0$ м/с. Температура на верхней границе тоже известна из измерений и равна 268 К. На нижней границе (лед) потенциальная температура за данный период линейно понижается с 265 К до 262,75 К. Начальными условиями в модели являются: u = 8 м/с, v = 0 м/с на всех высотах в пределах области интегрирования. В слое от поверхности до высоты 100 м потенциальная температуры равна 265 К. Выше данного слоя потенциальная температура увеличивается, ее градиент составляет 0,01 К/м. Начальные значения КЭТ задаются выражением

$$E = 0{,}4(1 - z/250)^3 \qquad (24)$$

Выше высоты 250 метров кинетическая энергия турбулентности равна нулю. Горизонтальная адвекция в данный период равна нулю, что соответствует измерениям.

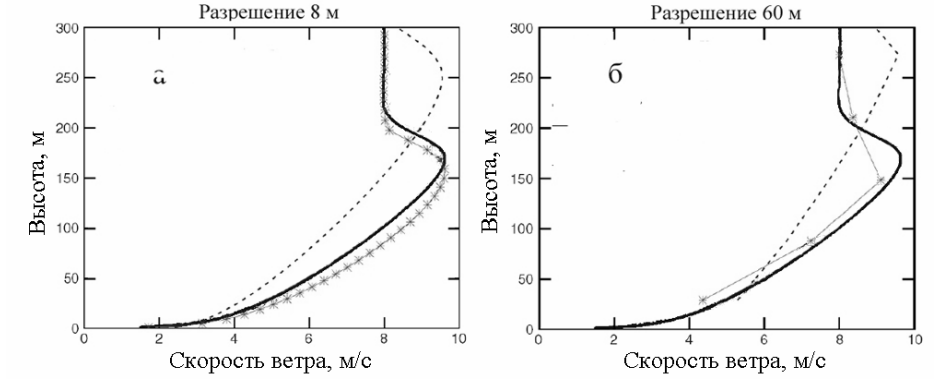
Для исследования чувствительности схемы параметризации модели к изменению разрешения по вертикали, эксперименты были проведены с разрешением, приблизительно составляющим 8 и 60 м. По вертикали используется расшатанная сетка, высота нижнего модельного уровня при данных разрешениях составляет приблизительно 3,5 и 31 м, соответственно. Результирующие профили потенциальной температуры приведены на рис. 1. Профиль потенциальной температуры, рассчитанный на основе схемы параметризации турбулентности с модификациями (рис. 1, *а*) при высоком разрешении практически соответствует эталонному профилю. Небольшое отклонение наблюдается на высотах выше 50 м. Базовая схема параметризации при данном разрешении немного переоценивает значение температуры до высоты 150 м и значительно недооценивает градиент температуры в слое 150–200 м. Результаты численных экспериментов свидетельствуют о чувствительности новой схемы параметризации к изменению разрешения по вертикали. При относительно грубом разрешении

модели (рис. 1, *б*) в новой схеме параметризации наблюдается отклонение вертикального профиля в сторону низких температур. В то же время базовая схема параметризации не чувствительна к изменению вертикального разрешения в условиях УПС.



а *б*

Рис. 1. Результирующие профили профили потенциальной температуры [K].
Черная кривая – эталонный профиль (детали см. в тексте), ×–× и - - - кривые – соответственно, профили, полученные на основе модифицированной и базовой схем параметризаций



а *б*

Рис. 2. Результирующие вертикальные профили скорости ветра [м/с].
Обозначения соответствуют обозначениям на рис. 1.

Профиль скорости ветра, рассчитанный с использованием модифицированной схемы при высоком разрешении также практически полностью соответствует эталонному профилю (рис. 2, *а*), в то время как базовая схема параметризации недооценивает скорость ветра приблизительно до высоты 200 м и значи-

тельно переоценивает высоту приземного струйного течения (высота, на которой наблюдается максимальная скорость ветра). Также как и для температуры, для скорости ветра при уменьшении вертикального разрешения в модифицированной схеме наблюдается искажение профиля, а именно сдвиг его в сторону меньших значений. Занижение температуры и недооценка значений скорости ветра при грубом разрешении для новой схемы параметризации обусловлены переоценкой турбулентного режима пограничного слоя атмосферы, что следует из рис. 3.

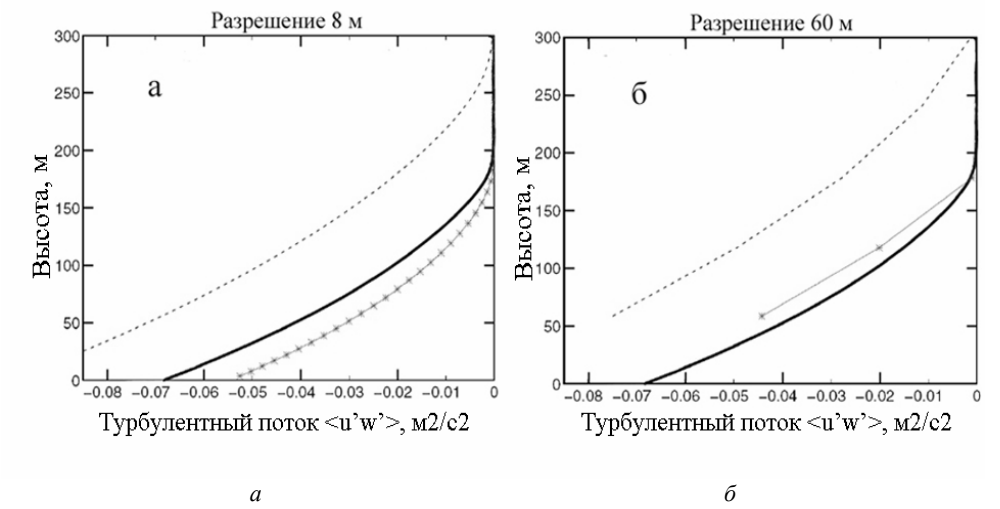


Рис. 3. Результирующие вертикальные профили турбулентного потока количества движения [$м^2/с^2$]. Обозначения соответствуют обозначениям на рис. 1.

Уменьшение разрешения ведет к сдвигу вертикального профиля кинематического турбулентного потока в сторону более высоких значений, т. е. к более интенсивному перемешиванию пограничного слоя.

Таким образом, модифицированная схема точнее воспроизводит температурно-ветровой режим пограничного слоя атмосферы над морским льдом в условиях выхолаживания и формирования устойчивой стратификации. Для применения модифицированной схемы турбулентного замыкания в оперативной практике необходимо дальнейшее ее тестирование над различными типами поверхности, а также проведение трехмерных численных экспериментов.

Заключение

Современные схемы турбулентного замыкания основаны на использовании полу-искусственных функций для учета стратификации. Ситуация устойчивого пограничного слоя атмосферы очень сложна для физического моделирования и применение данных функций может привести к ошибкам воспроизведения вертикальных профилей температуры, скорости ветра и турбулентных потоков.

В работе [Sukoriansky et al., 2005] для более корректного учета стратификации слоя были предложены функции устойчивости, полученные на основе спектральной модели КИМТ. В нашем исследовании была выполнена модификация блока турбулентного замыкания модели HIRLAM с использованием новых функций устойчивости и проведены численные эксперименты по тестированю этих функции с использованием данных эксперимента BASE. Расчеты показали хорошую согласованность профилей температуры, скорости ветра и турбулентных потоков, полученных на основе модифицированной схемы, с соответствующими профилями LES при высоком разрешении. При относительно грубом вертикальном разрешении наблюдается отклонение профилей для температуры – в сторону холодных температур, для скорости ветра – в сторону более низких значений. Было выявлено, что схема Льюиса (базовая схема) не чувствительна к изменению вертикального разрешения в условиях устойчивого пограничного слоя, что не логично с точки зрения физики, так как организация УПС имеет очень тонкую структуру. Схема, модифицированная на основе теории КИМТ, чувствительна к изменению вертикального разрешения. Это логично с точки зрения физики, но не удобно с точки зрения практических приложений, так как высокое разрешение требует больших вычислительных затрат. Однако тесты были проведены только для одного случая, и для более полного анализа необходимо дальнейшее тестирование схемы над различными типами поверхности, а также проведение трехмерных численных экспериментов.

Литература

1. *Бызова Н.Л., Иванов В.Н., Гаргер Е.К.* Турбулентность в пограничном слое атмосферы. – Л.: Гидрометеоиздат, 1989.
2. *Blackadar A.K., Tennekes H.* Asymptotic Similarity in Neutral Barotropic Planetary Boundary Layers // J. of the Atmospheric Sciences, 1968, vol. 25, pp. 1015–1020.
3. *Cuxart J., Holtslag A. A. M., Beare R. J., Bazile E., Beljaars A., Cheng A., Conangla L., Ek M. B., Freedman F., Hamdi R., Kerstein A., Kitagawa H., Lenderink G., Lewellen D., Mailhot J., Mauritsen T., Perov V., Schayes G., Steeneveld G. J., Svensson G., Taylor P., Weng W., Wunsch S., Xu K. M.* Single-Column Model Intercomparison for a Stably Stratified Atmospheric Boundary Layer // Boundary-Layer Meteorol, 2006, vol. 118, pp. 273–303.
4. *Cuxart J., Bougeault P., and Redelsperger J. L.* A turbulence scheme allowing for mesoscale and large-eddy simulations // Quart. J. Roy. Meteorol. Soc., 2000, v.126, pp.1–30.
5. *Derbyshire S.* Boundary-layer decoupling over cold surface as a physical boundary-instability // Boundary-Layer Meteorology, 1999, vol. 90, pp. 297–325.
6. *Derbyshire S.* Stable boundary-layer modelling: established approaches and beyond // Boundary Layer Meteorology, 1999, vol. 90, pp.423–446.
7. *Kosovic B., Curry J.A.* A Large Eddy Simulation Study of a Quasi-Steady, Stably Stratified Atmospheric Boundary Layer // J. Atmos. Sci., 2000, vol. 35, pp. 1052–1068.
8. *Louis J.F., Tiedtke M. and Geleyn J.-F.,* 1982. A short history of the operational PBL parametrization at ECMWF. – In Proc. ECMWF Workshop on Boundary Layer 42 Parametrization, ECMWF, Reading, UK, November 1981, pp. 59–80.
9. *Luis, J.F.* A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere // Boundary-Layer Meteorology, 1979, vol. 17, pp. 187–202

10. *Stoll R., Porte-Agel F.* Large-Eddy Simulation of the Stable Atmospheric Boundary Layer using Dynamic Models with Different Averaging Schemes // Boundary-Layer Meteorology, 2008, vol. 126, pp. 1–28.
11. *Sukoriansky S., Galperin B., Staroselsky I.* A quasinormal scale elimination model of turbulent flows with stable stratification // Physics of fluids, 2005, vol. 17, 085107.
12. *Sun J., Burns S.P., Lenschow D.H., Banta R., Newsom R., Coulter R., Frasier S., Ince T., Nappo C., Cuxart J., Blumen W., Lee X., Hu X-Z.* Intermittent тurbulence associated with a density current passage in the stable boundary layer // Boundary-Layer Meteorology, 2002, vol. 105, pp. 199–219.
13. *Lenderink, G. and Holtslag A.A.M.* An updated length-scale formulation for turbulent mixing in clear and cloudy boundary layers. – Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 2004, vol. 130 (604), pp. 3405 – 3427.
14. *Undén P., Rontu L., Järvinen H., Lynch P., Calvo J., Cats G., Cuxart J., Eerola K., Fortelius C., Garcia-Moya H.A., Jones C., Lenderink G., McDonald A., McGrath R., Navascues B., Nielsen N.W., Ødegaard V., Rodgriges E., Rummukainen M., Rõõm R., Sattler K., Saas B.H., Savijarvi H., Schreur B. W., Sigg R., The H., Tijm A.* HIRLAM-5 Scientific Documentation. – HIRLAM-5 Project, c/o Per Undén SMHI, S-601 76 Norrköping, Sweden, 2002.

А.М. Кокорин

МОДИФИКАЦИЯ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ РАССЕЯНИЯ СВЕТА НА ДВУХСЛОЙНОЙ ПРОСВЕТЛЕННОЙ СФЕРЕ И ЕГО ПРИМЕНЕНИЕ В ЗАДАЧАХ АТМОСФЕРНОЙ ОПТИКИ

A.M. Kokorin

THE MODIFIED DECISION OF A PROBLEM OF DISPERSION OF LIGHT ON THE TWO-LAYER ANTIREFLECTION SPHERE AND ITS APPLICATION IN PROBLEMS OF ATMOSPHERIC OPTICS

В работе предложен алгоритм расчета амплитудных коэффициентов Ми, используемых при вычислении основных характеристик рассеяния сферических частиц атмосферного аэрозоля с плавной радиальной неоднородностью показателя преломления. С помощью этого алгоритма оценено влияние влажности воздуха на элементы матрицы рассеяния радиально-неоднородными частицами пограничного слоя океанского аэрозоля.

Ключевые слова: коэффициенты Ми, радиально-неоднородных сферы, матрица рассеяния, океанский аэрозоль, пограничный слой.

Algorithm for calculation Mie amplitude coefficients is proposed. These coefficients are necessary for calculation the characteristics scattering features of spherical atmosphere aerosol particles with smooth radial inhomogeneity of the refraction index. C the help of this algorithm estimates influence effect of humidity on elements of the scattering matrix of the boundary layer of ocean aerosol.

Key words: Mie coefficients, radially inhomogeneous spheres, scattering matrix, ocean spray, boundary layer.

Решения задачи рассеяния на двухслойной радиально-неоднородной сфере. Для моделирования оптических свойств частиц морского аэрозоля наряду с однородными и двухслойными частицами используется модель просветленной сферы (ПС). Последняя представляет собой двухслойную сферическую частицу, внутренняя часть которой является однородным ядром с показателем преломления $n_1 > 0$, а наружная – неоднородный сферический слой, показатель преломления в котором непрерывно изменялся от n_1 до n_2.

Пусть r – расстояние от центра частицы, r_1, r_2 радиус ядра и оболочки, а λ – длина волны излучения во внешней. Оптическая структура ПС определяется зависимостью показателя преломления n от параметра ρ:

$$n(\rho) = \begin{cases} n_1 > 0, & 0 \le \rho < \alpha, \\ n_3 A \rho^m, & \alpha \le \rho < \beta, \\ n_2, & \rho = \beta, \end{cases} \tag{1}$$

где $\rho = kr$; $k = 2\pi\lambda^{-1}$; $\beta = kr_2$; $\alpha = kr_1$; $n = \rho_2/\rho_1$; A и m – вещественные или комплексные константы; показатель преломления внешней среды $n_3 = 1$. Величины n_1 и n_2 соответственно показатели преломления сухого аэрозольного вещества и оболочки частицы.

Решение задачи дифракции в дальней зоне для частиц ПС рассмотрено в [Kerker, 1966]. Формулы для расчета коэффициентов *Mu* a_n и b_n представлены в виде частного от деления определителей матриц:

$$D_{p+1}(z) = \frac{2(p+1)}{z} - \frac{1}{D_p(z)}; \tag{2}$$

$$b_l = \frac{\begin{vmatrix} J_\mu(X_\alpha) & J_{-\mu}(X_\alpha) & -n_1^{-0,5} J_{l+0,5}(n_1\alpha) & 0 \\ J_\mu(X_\beta) & J_{-\mu}(X_\beta) & 0 & J_{l+0,5}(\beta) \\ Q_l(\alpha) & \widehat{Q}_l(\alpha) & -f_l^{/}(\alpha) & 0 \\ Q_l(\beta) & \widehat{Q}_l(\beta) & 0 & g_l^{/}(\beta) \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} J_\mu(X_\alpha) & J_{-\mu}(X_\alpha) & n_1^{-0,5} J_{l+0,5}(n_1\alpha) & 0 \\ J_\mu(X_\beta) & J_{-\mu}(X_\beta) & 0 & H^{(2)}_{l+0,5}(\beta) \\ Q_l(\alpha) & \widehat{Q}_l(\alpha) & -f_l^{/}(\alpha) & 0 \\ Q_l(\beta) & \widehat{Q}_l(\beta & 0 & h_l^{/}(\beta) \end{vmatrix}}, \tag{3}$$

где

$$\mu = (2l+1)/2/(m+1); \tag{4}$$

$$\nu = [1/(m+1)][l(l+1) + (m+0,5)^2]^{0,5}; \tag{5}$$

$$X_\rho = [A/(m+1)]\rho^{m+1}; \tag{6}$$

$$V_l(\rho) = \frac{d}{dr}[\rho^{m+1}(\pi/2/\rho)^{0,5} J_\nu(X_\rho)]; \tag{7}$$

$$\widehat{V}_l(\rho) = \frac{d}{d\rho}[\rho^{m+1}(\pi/2/\rho)^{0,5} J_{-\nu}(X_\rho)]; \tag{8}$$

$$Q_l(\rho) = \frac{d}{d\rho}[\rho(\pi\rho/2)^{0,5} J_\mu(X_\rho)]; \tag{9}$$

$$\widehat{Q}_l(\rho) = \frac{d}{d\rho}[\rho(\pi\rho/2)^{0,5} J_{-\mu}(X_\rho)]; \tag{10}$$

$$f_l^{/}(\rho) = \frac{d}{d\rho}[\rho z_l^{(1)}(n_1\rho)]; \tag{11}$$

$$g_l^{/}(\rho) = \frac{d}{d\rho}[\rho z_l^{(1)}(\rho)]; \tag{12}$$

$$h_l^{/}(\rho) = \frac{d}{d\rho}[\rho z_l^{(3)}(\rho)]; \tag{13}$$

$$z_l^{(1)}(\rho) = (\pi/2/\rho)^{0,5} J_{l+0,5}(\rho); \tag{14}$$

$$z_l^{(3)}(\rho) = (\pi/2/\rho)^{0,5} H_{l+0,5}^{(2)}(\rho), \tag{15}$$

Здесь $J_p(z)$ и $H_p^{(2)}(z)$ соответственно цилиндрические функции Бесселя и Ханкеля второго рода порядка p, а $l = 1,\ 2,...\infty$ – номер парциальной волны.

Как показал численный эксперимент, использование формул (2), (3) для расчета светорассеивающих характеристик атмосферных частиц ПС для больших частиц ($\rho > 100$) приводит к нарастанию вычислительной ошибки и потере точности вычислений. Кроме того, использование стандартных рекуррентных соотношений для цилиндрических функций $J_p(z)$ и $H_p^{(2)}(z)$ с комплексными аргументом представляет собой сложную вычислительную проблему [Ватсон Г., Воронцов]. Таким образом, встаёт задача ввести такие специальные комбинации цилиндрических функций, использование которых позволило бы при проведении численных расчетов полностью исключить расчет обычных цилиндрических функций. Эффективность использования такого подхода была, например, проиллюстрирована в работе [Воронцов] на примере моделирования рассеяния на диэлектрических протяженных телах цилиндрической формы.

Для решения этой задачи введём следующие комбинации цилиндрических функций:

$$G_m(z) = \frac{J_m(z)}{N_m(z)};\ P_m(z,w) = \frac{J_m(z)}{J_m(w)};\ D_m(z) = \frac{N_{m+1}(z)}{N_m(z)};$$

$$V_m(p) = \frac{J_m^{/}(z)}{J_m(z)};\ R_m(z,w) = \frac{J_{m+1}(z)}{J_m(w)};\ F_m(z) = \frac{J_{m+1}(z)}{J_m(z)}. \tag{16}$$

Используя для производных (7)–(13) рекуррентное соотношение

$$Z_m^{/}(z) = Z_m(z)(m/z) - Z_{m+1}(z), \tag{17}$$

и выполнив элементарные преобразования определителей матриц (2), (3), можно привести выражения для коэффициентов Ми a_l и b_l к виду:

$$a_l = \frac{\begin{vmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 & a_{24} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} & 0 \\ a_{41} & a_{42} & 0 & a_{44} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \text{те же элементы,} & 0 \\ \text{что и в} & a_{24}^* \\ \text{определителе} & 0 \\ \text{числителя} & a_{44}^* \end{vmatrix}}; \tag{18}$$

$$b_l = \frac{\begin{vmatrix} b_{11} & b_{12} & a_{13} & 0 \\ b_{21} & b_{22} & 0 & a_{24} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} & 0 \\ b_{41} & b_{42} & 0 & a_{44} \end{vmatrix}}{\begin{vmatrix} \text{те же элементы,} & 0 \\ \text{что и в} & a_{24}^* \\ \text{определителе} & 0 \\ \text{числителя} & a_{44}^* \end{vmatrix}}. \tag{19}$$

Здесь $a_{11} = \alpha^m$; $a_{12} = \alpha^m$; $a_{13} = -n_1^{-0.5}$; $a_{21} = \beta^m P_\nu(X_\beta, X_\alpha)$; $a_{22} = \beta^m P_{-\nu}(X_\beta, X_\alpha)$;

$a_{24} = G_{l+0,5}(\beta)$;

$a_{31} = n^{-2}(\alpha)\alpha^{m-0,5}\{(m+0,5) + (m+1)[\nu - X_\alpha F_\nu(X_\alpha)]\}$;

$a_{32} = n^{-2}(\alpha)\alpha^{m-0,5}\{(m+0,5) + (m+1)[-\nu - X_\alpha F_{-\nu}(X_\alpha)]\}$;

$a_{33} = (\alpha n_1)^{-0,5} n_1^{-2}[\alpha n_1 F_l(\alpha n_1) - (\nu + 0,5)]$;

$a_{41} = n^{-2}(\beta)\beta^{m-0,5}\{[(m+0,5) + (m+1)\nu]P_\nu(X_\beta, X_\alpha) - (m+1)X_\beta R_\nu(X_\beta, X_\alpha)\}$;

$a_{42} = n^{-2}(\beta)\beta^{m-0,5}\{[(m+0,5) - (m+1)\nu]P_{-\nu}(X_\beta, X_\alpha) - (m+1)X_\beta R_{-\nu}(X_\beta, X_\alpha)\}$;

$a_{44} = \beta^{-0,5} G_{l+0,5}(\beta)[(l+0,5) - \beta F_{l+0,5}(\beta)]$;

$a_{24}^* = G_{l+0,5}(\beta) - I$; $b_{11} = 1$; $b_{12} = 1$;

$b_{21} = P_\mu(X_\beta, X_\alpha)$; $b_{22} = P_{-\mu}(X_\beta, X_\alpha)$;

$$b_{31} = \alpha^{-0,5}\left\{0,5 + (m+1)[\mu - X_\alpha F_\mu(X_\alpha)]\right\};$$

$$b_{32} = \alpha^{-0,5}\left\{0,5 - (m+1)[\mu + X_\alpha F_{-\mu}(X_\alpha)]\right\};$$

$$b_{33} = (\alpha n_1)^{-0,5}[\alpha n_1 F_l(\alpha n_1) - (\nu + 0,5)];$$

$$b_{41} = \beta^{-0,5}\{[0,5 + \mu(m+1)]P_\mu(X_\beta, X_\alpha) - (m+1)X_\beta R_\mu(X_\beta, X_\alpha)\};$$

$$b_{42} = \beta^{-0,5}\{[0,5 - \mu(m+1)]P_{-\mu}(X_\beta, X_\alpha) - (m+1)X_\beta R_{-\mu}(X_\beta, X_\alpha)\}. \qquad (20)$$

Таким образом, амплитудные коэффициенты *Ми* a_l и b_l выражены не через цилиндрические функции $J_p(z)$ и $H_p^{(2)}(z)$, а через их комбинации (16). Рекуррентные формулы для последних имеют следующий вид:

$$G_{p+1}(z) = G_p(z)\frac{F_p(z)}{D_p(z)};\ D_{p+1}(z) = \frac{2(p+1)}{z} - \frac{1}{D_p(z)};$$

$$F_{p+1}(z) = \frac{2(p+1)}{z} - \frac{1}{F_p(z)};\ V_{p+1}(z) = \frac{p+1}{z} - F_{p+1}(z);$$

$$R_{p+1}(z,w) = R_p(z,w)\frac{F_{p+1}(z)}{F_p(w)};\ P_{p+1}(z,w) = P_p(z,w)\frac{F_p(z)}{F_p(w)}. \qquad (21)$$

Как показали результаты численного эксперимента, многократное использование рекуррентных формул (21) вычисление комбинаций цилиндрических функций (16) с комплексными значениями переменных z, w от малых порядков к большим не сопровождаются быстрым накоплением относительных погрешностей. Это обстоятельство позволяет обеспечить сходимость и устойчивость амплитудных коэффициентов (18, 19) при вычислении характеристик светорассеяния ПС для больших дифракционных параметров ρ.

Влияние влажности воздуха на элементы матрицы рассеяния радиально-неоднородных частиц морского аэрозоля в приводном слое над морем.

Используя разработанный нами алгоритм, сравним элементы f_{33} и f_{43} приведенной матрицы рассеяния (ПМР) частиц ПС и двухслойными частицами (ДЧ), моделирующих мелкодисперсную составляющую океанского аэрозоля.

Реальные частицы этого типа аэрозоля, как правило, гигроскопичны, и поэтому существенное воздействие на их внутреннюю структуру оказывает влажность воздуха. При этом индивидуальные особенности частиц (форма, ориентации частиц) размываются и, вследствие этого, можно для описания их оптических характеристик использовать относительно простые модели.

В атмосферной оптике широко используются модели однородных и двухслойных частиц. Расчеты показали, что индикатрисы рассеяния этих моделей в большой степени зависят от микроструктурных параметров среды, а большие вариации этих параметров в свою очередь обусловлены, прежде всего, взаимодействием рассеивающих частиц с водяным паром.

В морском аэрозоле, наряду с однородными частицами (ОЧ) и ДЧ, в большом количестве встречаются частицы с плавной радиальной неоднородностью в переходном слое "ядро–оболочка" типа ПС (1). Примером таких частиц, например, могут служить ядра конденсации морских аэрозолей.

Как показано в теоретических работах [Кокорин, 2000, 2003, 2005] при определенных условиях характеристики светорассеяния ПСЧ просветленных сфер могут существенным образом отличаться от аналогичных характеристик ПСЧ, состоящих из ОЧ или ДЧ. Эти различия в зависимости от вариации микрофизических параметров среды могут иногда достигать порядков. Поэтому вполне очевидно, что для объективной интерпретации данных оптического зондирования дисперсных сред необходим учет внутренней структуры таких частиц. Изменение внутренней структуры частиц рассматривается как результат изменения влажности воздуха.

Вопрос о поведении характеристик рассеяния важен для задач атмосферной оптики и некоторых технических приложений. Отметим, что исследование влияния внутренней структуры частиц реального морского аэрозоля на ПМР в приближении полидисперсных систем ПС, насколько нам известно, раннее никем не проводилось.

Примем ряд предположений, упрощающих проведение анализа. Будем рассматривать два наиболее типичных механизма обводнения гигроскопичных частиц морского аэрозоля во влажном воздухе:

а) укрупнение частиц с частичным растворением сухого ядра (модель ПС);

б) укрупнение частиц с частичным растворением первоначально сухого ядра (модель ДЧ).

Спектр размеров частиц аэрозоля по размерам будем описывать зависимостью типа Юнге, характерной для естественных аэро- и гидрозолей:

$$f(r) = dN(r)/d(\log r) = c_1\, r^{-\nu},$$
$$c_1 = \nu\left(r_{\min}\, r_{\max}\right)^{\nu}\left(r_{\max}{}^{\nu} - r_{\min}{}^{\nu}\right)^{-1}, \qquad (23)$$

где r – радиус частицы; $dN(r)$ – число частиц; $r_{\min}$, $r_{\max}$ – минимальный и максимальный радиусы частиц в системе; ν – параметр распределения.

Для заданной относительной влажности q параметр h в расчетах принимался постоянным, не зависящим от внешних размеров обводненных частиц. Радиусы ядра r_1, оболочки r_2, показатели преломления ядра n_1 ДЧ и ПС принимались равными по величине. При вычислении характеристик ПМС систем ДЧ и

ПС параметр n_2 для последней задавался так, чтобы при заданных геометрических размерах частиц средний по объему показатель преломления $\overline{n} = \int_V n dV / V$ ПС был равен показателю преломления ДЧ. Мнимая часть показателя преломления полагалась равной нулю. Это допущение вполне оправдано, так как на рассматриваемой длине волны (λ = 0,55 μm) поглощение веществ, образующих атмосферных аэрозоль, весьма незначительно.

Рассчитанные для модели ПС характеристики ПМС сравнивались с аналогичными характеристиками для ДЧ. Близость f_{33} и f_{43} рассматриваемых моделей оценивалась по величине отношений:

$$\Delta_1(\gamma) = \frac{f_{33}^{ДЧ}}{f_{33}^{ПС}},\ \Delta_2(\gamma) = \frac{f_{43}^{ДЧ}}{f_{43}^{ПС}}. \tag{24}$$

Здесь $f_{33}^{ПС}$, $f_{33}^{ДЧ}$, $f_{43}^{ПС}$ и $f_{43}^{ДЧ}$ – элементы матрицы рассеяния соответственно для моделей ПС и ДЧ частиц.

Для оценки влияния внутренней структуры частиц на ПМС ансамбля гигроскопичных частиц, для двух выше указанных механизмов их обводнения, нами был проведен численный эксперимент. Расчеты проводились в приближении полидисперсных систем двух близких по внутренней структуре частиц ПС и ДЧ.

Значения относительной влажности менялись в следующем диапазоне:

$$q = 0{,}1\ (0{,}01)\ 0{,}95;$$

$$\nu = 1\ (0{,}1)\ 4. \tag{25}$$

Здесь в скобках обозначен шаг для указанного параметра. В расчетах показатель преломления n_1 задавался равным 1,55 и 1,65.

В работе рассматривалась мелкодисперсная фракция аэрозольных частиц ($a_{\min} = 0{,}05\mu m$ и $\alpha_{\max}$ = 8μm). Она в большинстве случаев определяет оптические характеристики аэрозоля в приводном слое над морем для видимой области спектра.

Как показал анализ данных расчетов, зависимость $f_{33}^{ПС}(\gamma)$ при $\gamma < 130°$ слабо чувствительна к механизму обводнения частиц аэрозоля. При различных условиях расчета рассматриваемых моделей для диапазона параметров (25) характеристика $f_{33}^{ПС}(\gamma)$ с погрешностью, не превышающей 6–10 %, может быть аппроксимирована с помощью модели ДЧ со средним по объему показателем преломления.

Вместе с тем, в области углов рассеяния $135 < \gamma < 170$ ° для любого ν из (5) различия для f_{33} весьма существенны.

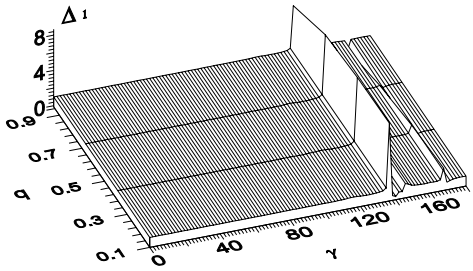


Рис. 1. Угловые зависимости характеристики $\Delta_1(\gamma, q)$ для полидисперсных систем просветленных и двухслойных сфер, моделирующих фракцию морского аэрозоля: $n_1 = 1{,}55$, $\alpha_{min} = 0{,}05\mu m$, $\alpha_{max} = 8\mu m$, $\nu = 4$ при $\lambda = 0{,}6328\ \mu m$

На рис. 1 представлена характеристика Δ_1 для случая $\nu = 4$. В интервале углов рассеяния $\gamma \approx 132$–$140°$ зависимость $\Delta_1(\gamma, q)$ имеет узкий максимум ($5 < \Delta_1 < 8{,}5$), а при $\gamma \approx 162$–$170°$ двойной минимум–максимум ($0{,}2 < \Delta_1 < 1{,}8$). Характерно, что при увеличении в атмосфере доли крупных аэрозольных частиц типа ПС первый экстремум исчезает. Второй (при $\nu \leq 2$) превращается в большой максимум ($6 < \Delta_1 < 10$). Отметим также, что с ростом влажности и изменением внутренней структуры аэрозольных частиц величина этого максимума уменьшается.

Угловые зависимости элемента f_{43} для моделей ПС и ДЧ имеют значительные количественные и качественные различия.

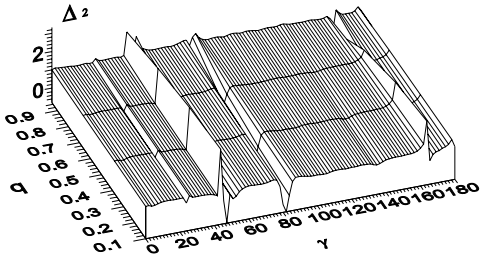


Рис. 2. Угловые зависимости характеристики $\Delta_2(\gamma, q)$. Остальные обозначения те же, что и на рис. 1

На рис. 2 представлено типичное для рассматриваемого диапазона параметров (5) поведение зависимости $\Delta_2(\gamma, q)$. Как видно из рисунка, даже для узкого распределения, в котором преобладающую роль играют мелкие частицы, можно выделить характерные диапазоны γ, в которых $\Delta_2(\gamma, q)$ имеет экстремальные значения. Это наиболее глубокий минимум и максимум ($-0{,}8 < \Delta_2 < 3{,}3$) в районе углов рассеивания $\gamma \approx 40$–$52°$, а также максимум ($\Delta_2 \approx 2{,}3$) при $\gamma \approx 165$–$178°$. В диапазоне углов $\gamma \approx 20$–$25°$ и $\gamma \approx 78$–$85°$ имеются ещё соответственно два характерных минимума ($\Delta_2 \approx 0{,}7$ и $\Delta_2 \approx -0{,}79$). При этом с уменьшением па-

раметра ν увеличивается первый и уменьшается второй минимум. Соответственно до $\Delta_2 \approx -0{,}9$ и $\Delta_2 \approx 0{,}7$ при $\nu = 2$.

Таким образом, выше указанные особенности (положение и глубина экстремумов) в поведении зависимостей $\Delta_1(\gamma, q)$ и $\Delta_2(\gamma, q)$ могут служить отличительным признаком для рассеяния света ПСЧ с внутренней структурой типа ПС от аналогичных систем с ДЧ.

Выводы

A. Использование комбинаций цилиндрических функций позволяет упростить решение задачи дифракции света на двухслойной частицы с неоднородным слоем и свести к минимуму накопление ошибок округления. Обеспечивает быструю сходимость и устойчивость амплитудных коэффициентов (18, 19) при вычислении характеристик светорассеяния ПС для больших дифракционных параметров ρ.

B. Предложенная нами модель ПС является примером возможного получения необходимых сведений о внутренней структуре реальных частиц прибрежного морского аэрозоля в пограничном слое атмосферы, при использовании натурных измерений характеристик f_{33} и f_{43}.

C. Рассмотренные механизмы обводнения гигроскопичных частиц аэрозоля позволили выявить ряд особенностей в поведении ПМС ансамбля ПС. Установлено:

1) неучет радиальной неоднородности структуры аэрозольных частиц может привести при оценке в отдельных диапазонах углов рассеяния характеристик f_{33} к существенным (более 100 %) погрешностям при интерпретации данных измерений;

2) характеристика $f_{33}^{\text{ПС}}(\gamma)$ при $\gamma < 130°$ слабо чувствительна к механизму обводнения частиц аэрозоля.

Литература

1. *Ватсон Г.* Теория бесселевых функций / Пер. с англ. – М.: ИЛ, 1949. – 893 с.
2. *Воронцов А.А., Мировицкая С.Д.* Новые функции для численного решения электродинамических задач в цилиндрической и сферической системе координат // Радиотехника и электроника, 1989, № 11, с. 2294–2299.
3. *Кокорин А.М., Шифрин К.С.* Влияние влажности на характеристики рассеяния света радиально-неоднородными частицами аэрозоля над морем // Оптический журнал, 2000, т. 67, № 1, с. 55–60.
4. *Кокорин А.М., Шифрин К.С.*. Влияние влажности на локационное рассеяние ансамбля малых гигроскопичных неоднородных частиц // Оптический журнал, 2003, т. 70 № 5, с. 62–67.
5. *Кокорин А.М.* Влияние влажности на показатель и коэффициент ассиметрии индикатрисы рассеяния света радиально-неоднородными частицами аэрозоля в пограничном слое над морем // Оптический журнал, 2005, т. 72, № 2, с. 14–18.
6. *Kerker M., Kauffman L. H., Farone W.A.* Scattering of electromagnetic waves from two concentric spheres when the outer shell has a variable refractive index // J. Opt. Soc. Amer. 1966, vol. 56, № 8, p. 1053–1056.

В.Я. Александров, А.Я. Коржиков

КОЛЕБАНИЯ СРЕДНЕГОДОВЫХ АНОМАЛИЙ ТЕМПЕРАТУРЫ ВОЗДУХА НА АНТАРКТИЧЕСКОМ ПОЛУОСТРОВЕ В СВЯЗИ С ОСОБЕННОСТЯМИ АТМОСФЕРНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЮЖНОЙ ПОЛЯРНОЙ ОБЛАСТИ

V.Ya. Alexandrov, A.Ya. Korjikov

FLUCTUATIONS OF MID-ANNUAL ANOMALIES OF TEMPERATURE OF AIR ON ANTARCTIC PENINSULA IN CONNECTION WITH FEATURES OF ATMOSPHERIC PROCESSES IN SOUTHERN POLAR AREA

Рассмотрена одна из возможных причин колебаний приземной температуры воздуха в регионе Антарктического полуострова.

Ключевые слова: колебания, аномалии температуры воздуха, особенности атмосферных процессов, Южная полярная область.

One of the possible reasons of fluctuations of ground temperature of air in region of Antarctic peninsula is considered.

Key words: fluctuations, air temperature anomalies, features of atmospheric processes, south polar region.

Климатические изменения происходят в атмосфере Земли с момента образования газовой оболочки нашей планеты. Периоды глобального похолодания приходили на смену периодам глобального потепления и наоборот. К основным климатообразующим факторам в 20-м столетии прибавилось все возрастающее антропогенное влияние.

Среди ученых, занимающихся изменением климата, нет единого мнения об основных причинах происходящего. Одни считают, что современное повышение температуры на Земле обусловлено исключительно возрастающим антропогенным воздействием. Другие остаются верны основным действующим факторам, которые работали еще до появления человека на Земле. По всей видимости, истина лежит где-то посередине. Очевидно, что современные климатические изменения на Земле – есть продукт комплексного воздействия всех действующих факторов, включая и антропогенное влияние.

В Антарктике, которая удалена от основных центров хозяйственной активности человека, в последние десятилетия также происходят существенные изменения в климатической системе. За последние 50 лет произошло потепление в западной Антарктиде. Особенно ярко потепление проявилось на Антарктическом полуострове. На рис. 1 приведен график, построенный по среднегодовым значениям температуры воздуха на станциях, находящихся на Антарктическом п-ве (рис. 2) и прилегающих островах (табл. 1).

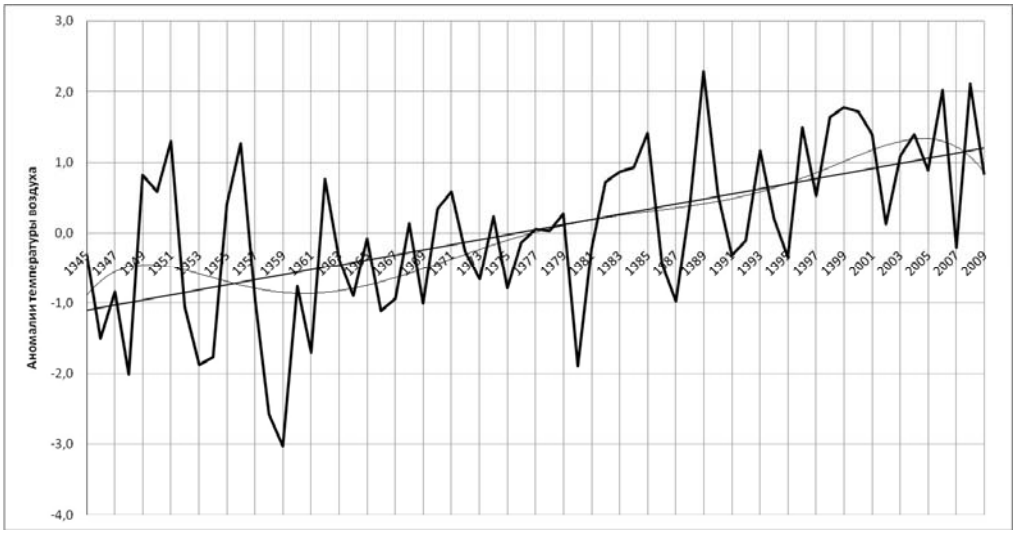


Рис. 1. Изменение средних годовых аномалий температуры воздуха на Антарктическом п-ве и прилегающих островах за период с 1945 по 2009 г.

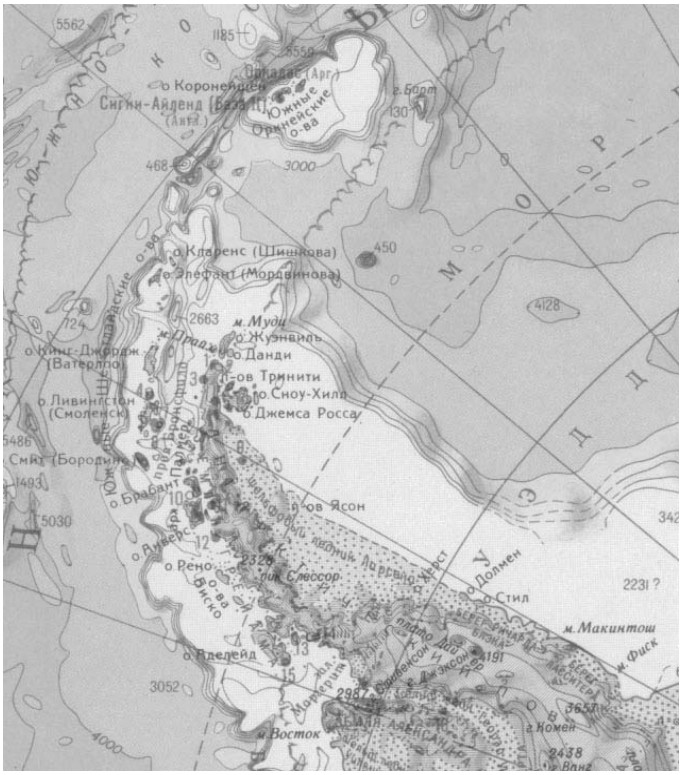


Рис. 2. Карта региона Антарктического п-ва.

Таблица 1

Название станции и период работы	Местоположение станции	Географические координаты
Сигню-Айленд (Великобритания). С 1947 г. по настоящее время	Южные Оркнейские о-ва	60°43’S, 45°36’W
Беллинсгаузен (Россия). С 1968 г. по настоящее время	Южные Шетландские о-ва, о. Кинг-Джордж	62°12’S, 58°58’W
Теньенте-Хубани (Аргентина). С 1982 г. по настоящее время	Южные Шетландские о-ва, о. Кинг-Джордж	62°14’S, 58°40’W
Хенераль Бернардо-О’ Хиггинс (Чили). С 1948 г. по настоящее время	Антарктический п-ов	63°19’S, 57°54’W
Эсперанса (Аргентина). С 1952 г. по настоящее время	Антарктический п-ов	63°24’S, 57°00’W
Фарадей (Великобритания). С 1995 г. – Вернадский (Украина). С 1947 г. по настоящее время	Архипелаг Арджентайн, западное побережье Антарктического п-ова	65°14’S, 64°15’W

Из анализа рис. 1 следует, что с 1945 г. средняя годовая температура на полуострове повысилась на 2,4–2,6 °, что согласуется с данными, полученными в других работах [3, 4], а также представленными на Международной научной конференции «Морские исследования полярных областей Земли, проведенные в период международного полярного года 2007/08» (ААНИИ, апрель 2010 г.) [Лагун, 2010].

Климат Антарктического полуострова формируется в результате сложного взаимодействия между атмосферой, океанами и морским льдом. Протянувшись с юга далеко на север (до широты 62 °) полуостров является препятствием для интенсивного широтного западно-восточного переноса, который господствует в тропосфере южной полярной области в течение всего года. Можно сказать, что температура воздуха на Антарктическом полуострове должна существенно зависеть от характера атмосферной циркуляции, от преобладающих переносов воздуха в нижней тропосфере.

На рис. 3 и 4 приведены схемы локализации приземных центров барических образований над южной полярной областью в годы с экстремальными аномалиями температуры воздуха. К экстремальным отнесены те годы, в которых аномалии температуры воздуха превышали стандартное отклонение (1,2 °).

Основной чертой макросиноптического процесса в экстремально холодные годы (рис. 3) является формирование гребней, направленных от приполюсной области континента в сторону Антарктического п-ва, Земли Мери Бэрд. Происходит преимущественное блокирование интенсивного западно-восточного переноса воздушных масс и преобладание воздушных потоков с южной составляющей вдоль восточных периферий барических гребней. Потоки с южной составляющей обусловливают адвекцию холодных воздушных масс с континента и, как следствие, формирование значительных отрицательных аномалий температуры воздуха на полуострове в течение года.

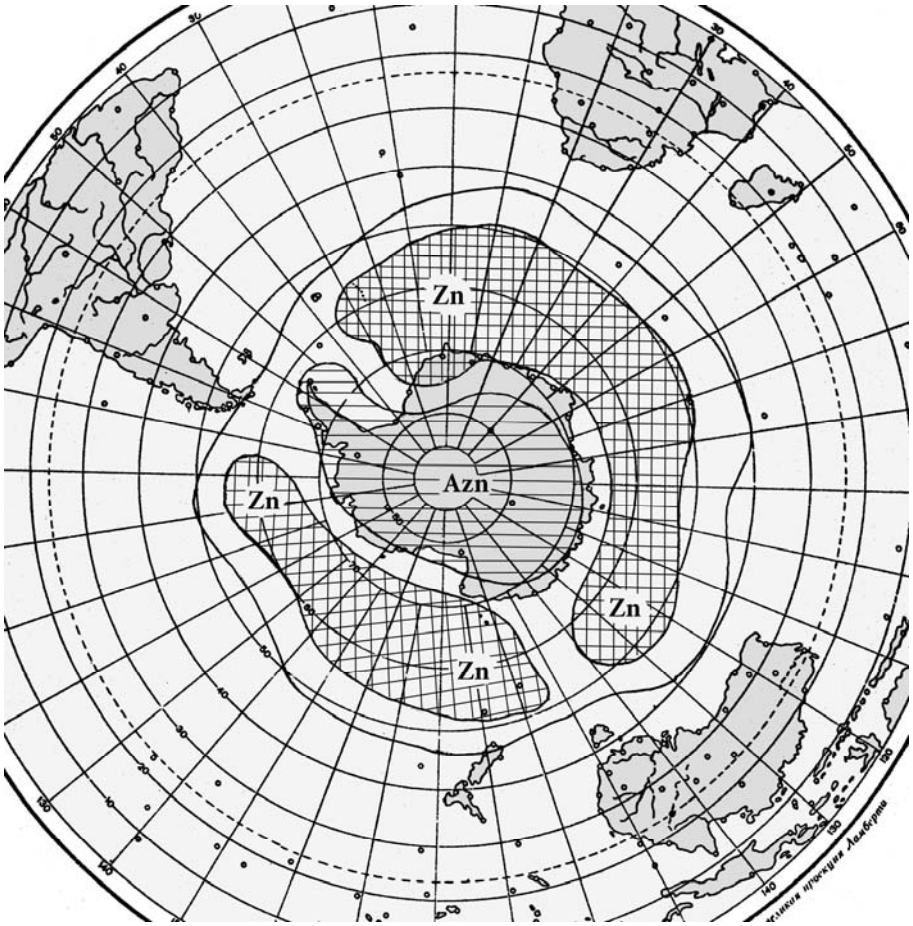


Рис. 3. Расположение приземных центров барических образований над южной полярной областью в экстремально холодные годы

На рис. 4 приведена схема среднегодового макросиноптического процесса, который характерен для лет с экстремально высоким фоном температуры воздуха на Антарктическом п-ве и прилегающих островах.

Из анализа рис. 4 видно, что макросиноптический процесс существенно отличается от процесса, представленного на рис. 3. Максимальное различие наблюдается в районе Антарктического п-ва. Экстремально теплые годы характеризуются развитием активной циклонической деятельности в районе 70-го градуса южной широты в тихоокеанском секторе антарктических вод. Причем в большинстве месяцев ложбина от запада располагается над Антарктическим полуостровом. Последнее обстоятельство обусловлено частыми выходами восточно-тихоокеанских циклонов, которые приводят к мощной адвекции теплого воздуха в район полуострова.

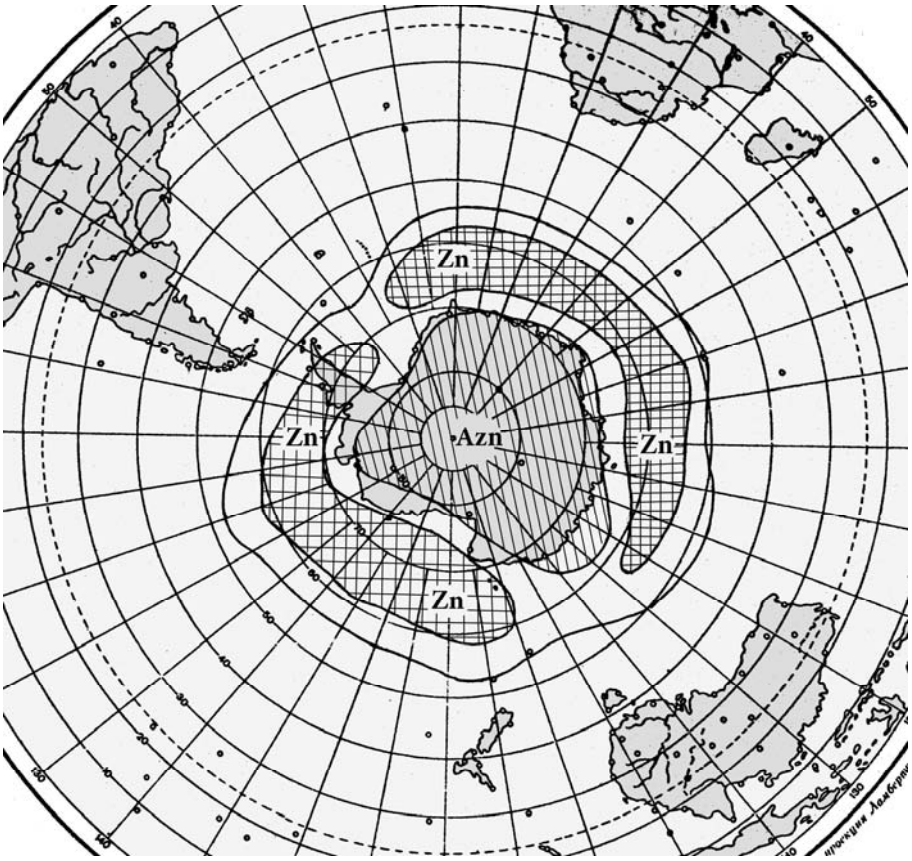


Рис. 4. Расположение приземных центров барических образований над южной полярной областью в экстремально теплые годы

В экстремально теплые годы западно-восточный перенос в нижней тропосфере существенно смещается в сторону Антарктиды, что приводит к активизации циклонической деятельности на антарктическом фронте вдоль побережья континента.

Схема макросиноптического процесса, представленного на рис. 4, является характерной для всего периода потепления (последние 10–15 лет).

Таким образом, можно отметить, что потепление в Антарктике тесным образом связано с изменениями в циркуляции атмосферы над южной полярной областью.

Аналогичные выводы были получены ранее для северной полярной области, где потепление связывается с усилением циклонической деятельности на полярном и арктическом фронтах [Куражов, 2007].

В последние годы наметилась тенденция понижения среднегодовой температуры воздуха на Антарктическом п-ве. Это хорошо видно, если сгладить кривую аномалий среднегодовой температуры воздуха (рис. 2) полиномом шестой степени. По всей видимости, намечается тенденция усиления антарктического антициклона и его влияния на Антарктический п-ов.

Литература

1. *Куражов В.К., Иванов В.В., Коржиков А.Я.* Роль атмосферной циркуляции в формировании долгопериодных колебаний климата Арктики // Труды ААНИИ, 2007, т. 447, с. 33–43.
2. *Лагун В.Е, Иванов Н.Е., Коротков А.И., Клепиков А.В., Яговкина С.В.* Изменения гидрологических условий в районе Антарктического полуострова в режиме регионального потепления // Международная научная конференция «Морские исследования полярных областей Земли в Международном Полярном году 2007/08» Программа и тезисы докладов. – СПб: ААНИИ. 2010, с. 140–141.
3. *Тимофеев В.Е.* Климатические индексы Южного полушария и их связь с тропосферной циркуляцией // УАЖ, 2005, № 3.
4. IPCC Expert Meeting on Detection and Attribution Related to Anthropogenic Climate Change Geneva, Switzerland, 14–16 September 2009.

А.П. Филиппенко, С.П. Смышляев, П.А. Блакитная

ХИМИЧЕСКИЕ МЕХАНИЗМЫ ТРАНСФОРМАЦИИ ТОКСИЧНЫХ ГАЗОВ В АТМОСФЕРЕ

A.P. Filippenko, S.P. Smyshlyaev, P.A. Blakitnaya

MECHANISMS OF TOXIC GASES TRANSFORMATION IN THE ATMOSPHERE

Приводится описание разработанного фотохимического механизма в боксовой модели трансформации токсичных газов атмосферы. Модель используется для составления цепочек реакций, удовлетворяющих требованию сохранения газов, вступающих и образующихся в результате цикла реакций; для сравнения скоростей реакций, входящих в каталитические циклы для различных диапазонов характерных для атмосферы температур, влажности, потоков солнечной радиации при различных зенитных углах солнца и содержания основных атмосферных газов и выделения каталитических циклов, учет которых необходим для правильного описания процессов разрушения токсичных газов в атмосфере.

Ключевые слова: токсичные газы, атмосфера, химические реакции в атмосфере, времена жизни токсичных газов.

Description of developed photochemical mechanisms to use in the box model of toxic gases transformation is presented. The model is used to form chemical reaction chains to keep gases conservation during their chemical production and destruction, to compare catalytic reaction rates for different atmospheric temperatures, humidity, solar radiation fluxes for different zenith angles and basic gases composition and for deriving catalytic cycles to include in to chemical models for correct simulation toxic gases transformation.

Keywords: toxic gases, atmosphere, atmospheric chemical reactions, lifetime.

Исследования микроклимата приобретают все большее значение, поскольку необходимо уловить и спрогнозировать вариации параметров среды жизнедеятельности человека в условиях наблюдаемых изменений глобального климата. Особое место в этих исследованиях занимает расчет энергетического баланса. В атмосфере происходит интенсивная химическая трансформация первичных токсичных газов, попадающих в нее с земной (подстилающей) поверхности [Seinfeld, 1998]. В результате химических реакций могут образовываться вторичные токсичные газы, не имеющие источников на поверхности. Основная экологическая роль химических реакций с участием первичных токсичных газов в нижней атмосфере определяется ее окислительными свойствами [Jacob, 1999]. Процесс окисления в атмосфере заключается в отделении атомов от химически активных газов земного происхождения что инициирует процесс их химической трансформации, т.е. изменения их экологических свойств.

Способность газов поверхностного происхождения к окислению в атмосфере зависит от их химических свойств. Например, углекислый газ CO_2 прак-

тически не окисляется в атмосфере, а угарный газ CO – окисляется довольно интенсивно. Многие токсичные газы вымываются из атмосферы главным образом в результате окисления: это парниковые газы, такие как метан (CH_4), токсичные продукты горения, такие как угарный газ (CO), участники разрушения стратосферного озона, такие как хлорфторуглеводороды (HCFCs), и другие [Еланский, 2004].

Эти газы имеют относительно слабую химическую активность и большие времена жизни в атмосфере, в результате чего они достаточно интенсивно переносятся атмосферной циркуляцией, перемешиваются по всей атмосфере и играют экологическую роль не только в местах их выбросов с поверхности, но и прилегающих и отдаленных регионах [Seinfeld, 1998]. Тем не менее, химические реакции с их участием в атмосфере являются очень важными, т.к. они определяют региональные и глобальные стоки этих экологически важных газов, которые можно назвать источниковыми, т.к. они привносят в атмосферу атомы углерода, азота, водорода, хлора, брома и другие. Таким образом, их химическая активность определяет, во-первых, их вклад в парниковый эффект, во-вторых, в нагрев и охлаждение атмосферы, в-третьих, в источники и баланс химических элементов в атмосфере.

Другие химически активные газы земного происхождения могут испытывать в атмосфере не окислительные, а восстановительные химические реакции, влияя тем самым на процессы окисления и на процессы формирования химически активных вторичных токсичных газов, таких как озон [Gery et al, 1989]. К таким газам относятся азотные радикалы, водородосодержащие газы, серные, хлорные и бромные газы. Их химическая активность в атмосфере, благодаря способности к восстановительным реакциям, значительно выше химической активности источниковых газов. В результате их химическое время жизни в атмосфере небольшое, существенно меньше постоянной времени атмосферного переноса, в результате чего эти газы, которые из-за высокой химической активности называют радикалами, имеют, в основном, местные эффекты и практически не влияют на глобальный баланс химических элементов, входящих в их состав.

Для классификации первичных токсичных газов на имеющие только локальное значение и подверженные трансграничному переносу необходимо изучать механизмы их химической трансформации в атмосфере и, на этой основе, оценивать их время жизни в атмосфере. Исследование химических механизмов трансформации первичных газов необходимо также для расчета скоростей формирования и эволюции вторичных токсичных газов, экологическая роль которых может быть даже более важной, чем роль первичных химически активных газов.

В этой связи, главной целью настоящей работы является разработка механизмов атмосферной трансформации химически активных токсичных газов земного происхождения и разработка методологии оценки их времени жизни в атмосфере, с тем, чтобы разделить их на источниковые и радикальные газы, а также изучить их потенциал для формирования вторичных токсичных газов, таких как озон.

Методология

Составление химических механизмов атмосферной трансформации токсичных газов может быть реализовано путем описания химических циклов отдельно выбранных газов с учетом особенностей региона исследования (урбанизированная территория, прибрежная зона, горная местность), характера выбросов в подстилающую поверхность атмосферы, характерных метеорологических полей в регионе. Для оценок времени нахождения в атмосфере химически активных газов необходимо создавать модель их эволюции на основе разработанных химических механизмов их трансформации.

Математические модели химических процессов в атмосфере требуют разработки химических механизмов, т.е. оптимального набора газовых составляющих урбанизированной атмосферы и химических реакций, описывающих циклы продукции и разрушения газов в приземном слое атмосферы и приповерхностном слое подстилающей поверхности, а также система дифференциальных уравнений, описывающих эти реакции. Определяются константы этих реакций и зависимости скоростей химических реакций от окружающих метеорологических и радиационных условий и начальных концентраций газовых выбросов с поверхности Земли. Химический механизм также включает список реакций индивидуальных, первичных и вторичных газовых загрязнителей, количественную оценку выбросов первичных газовых загрязнителей, а также промежуточные и результирующие реакции [JPL, 2003].

Химический состав воздуха в региональном масштабе представляет интерес не только с точки зрения качества воздуха, но и с метеорологической и климатической точек зрения [Pielke, 1984]. В этой связи химические механизмы должны встраиваться в химико-динамические модели, ориентированные на урбанизированные зоны, которые позволяют изучать химические трансформации токсичных газов в приповерхностном слое атмосферы, а также оценивать способность таких газов к локальной трансформации и трансграничному переносу.

Практическая реализация химической транспортной модели требует создания алгоритмов численного решения жестких систем математических уравнений, описывающих временную эволюцию каждой из исследуемых химически активных примесей, реализация разработанных алгоритмов на алгоритмическом языке Фортран и создание численных моделей на современных вычислительных машинах [Stockwell, 1997].

Исторически сложилось так, что развитие численного моделирования и моделирования химических процессов развивались независимо. Еще в предыдущем десятилетии разрешение численных моделей прогноза погоды не позволяло прогнозировать состав атмосферного воздуха в региональном масштабе. Такие модели должны учитывать множество атмосферных процессов. Сегодня проблема интегрирования моделей химического переноса и региональных климатических моделей прогноза погоды является ключевой в области атмосферного моделирования [Stull, 1988]. Таким образом, региональные численные мо-

дели прогноза погоды, интегрированные с моделью химических трансформаций являются новым поколением прогностических моделей с более точным метеорологическим прогнозом, прогнозом химического загрязнения окружающей среды, имеющим в составе описание фотохимических процессов и химических реакций [Chan et al, 1996].

Общее математическое описание механизмов влияния данных процессов на концентрации газов уравнениями неразрывности является основой для создания химических транспортных моделей. Современные ХТМ учитывают множество атмосферных процессов влияющих на атмосферную химию (облачность, осадки, тип подстилающей поверхности или альбедо и т.д.), тем самым усложняя модель, так что уравнение неразрывности не может быть решено точно.

При изучении геохимических циклов, разработке химического механизма обращаются к простым моделям атмосферы – боксовым моделям, представляющих Эйлеровский подход к нахождению приближенного решения уравнения неразрывности. Примером такой модели может послужить боксовая модель BAQM, разработанная на кафедре Метеорологических прогнозов РГГМУ. Моделирование проводилось на языке Фортран 90. Модельные расчеты были проведены на недельный период, с 6 минутным шагом по времени, начиная с полуночи и на следующие 24 часа.

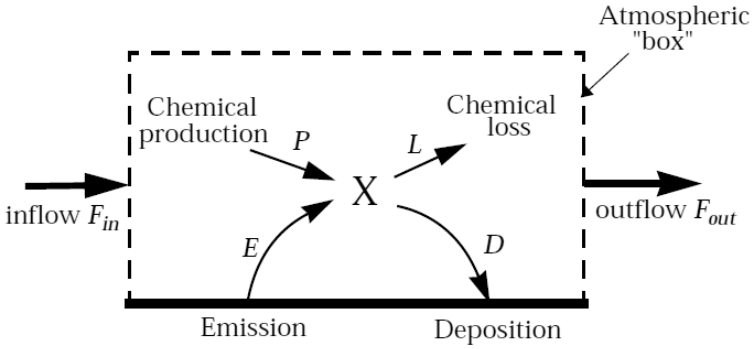


Рис. 1. Схема боксовой модели атмосферы. [Jacob, 1999]

Она описывает поведение газа внутри ограниченного объема, представляющего собой выбранную область атмосферы, которая может быть урбанизированной зоной, территорией РФ или глобальной атмосферой. Перенос газа представлен как приток X в область (*Fin*) и отток из области (*Fout*). Если данной областью является глобальная атмосфера, то *Fin* = *Fout* = 0. На скорости образования и разрушения газа X внутри области влияют новые выбросы (*E)*, химическая продукция (*P)*, химическое разрушение *(L)*, и осаждение (*D)*. Составляющие *Fin*, *E,* и *P* являются источниками газа X в выбранной области; составляющие *Fout*, *L*, и *D* являются разрушителями газа *X*. Масса вещества X в области обычно называется инвентором (*inventory)* а сама рассматриваемая область называется резервуаром (*reservoir)*.

Модель один-бокс не позволяет решить проблему пространственного распределения концентрации X внутри области. Для упрощения расчетов притоков и оттоков газа предполагают, что концентрация газа в области бокса со временем выравнивается вследствие перемешивания. Влажное вымывание из атмосферы описывается как часть химического оттока газа из атмосферы, сухое осаждение описывается по методологии Дракслера и Хисса в [1997] по классической аналогии сопротивления мультиуровня и как функция скорости трения, поверхностные характеристики Монина-Обухова.

Характерный временной масштаб перемешения воздуха, и следовательно загрязнителей в тропосфере представлен на рис. 2. Перемещение в долготном направлении является наиболее протяженным, вследствие геострофического перемещения из-за изменения широтного градиента температуры.

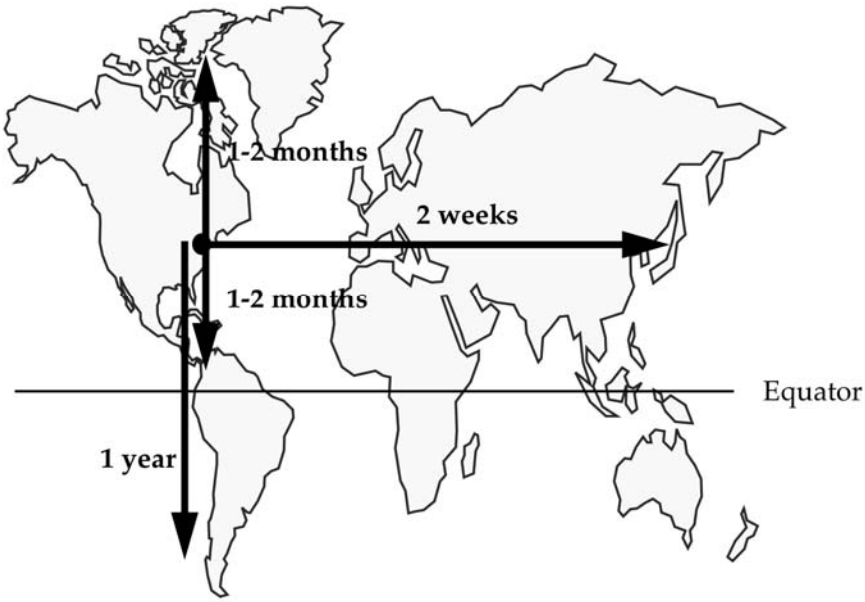


Рис. 2. Временной масштаб глобального горизонтального перемещения воздуха в тропосфере [Jacob, 1999]

Скорость ветра в долготном направлении составляет порядок 10 м/с. Меридиональный перенос более медленный, скорость переноса составляет около 1м/с и перемешивание воздуха средних широт с тропическим или полярным занимает от 1 до 2 месяцев. Межполушарный перенос является еще более медленным вследствие отсутствия термического форсинга на экваторе. Таким образом, атмосферный обмен между полушариями занимает около года и осуществляется путем горизонтального перемешивания конвективных потоков из внетропической зоны конвергенции.

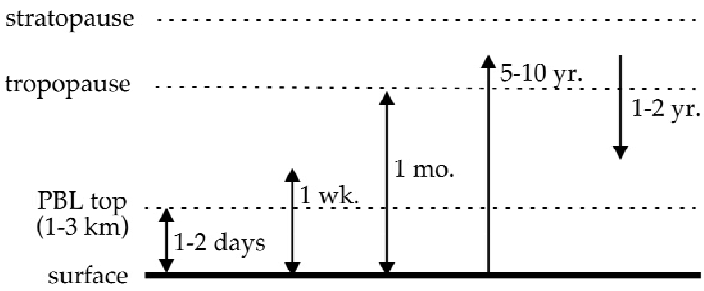


Рис. 3. Временной масштаб вертикального переноса примесей в тропосфере

Простая боксовая модель позволяет описать важный и основной аспект атмосферной химии, время жизни. Время жизни t газа X в боксе определяется как среднее время нахождения молекулы X в боксе, а именно отношение массы m (кг) газа X в боксе к скорости разрушения F_{out} + L + D :

$$\tau = \frac{m}{F_{out} + L + D}$$

Времена жизни газов в атмосфере можно разделить на динамические и химические – обратно-пропорциональная величина химического разрушения газа L. Также можно определить отношение стока концентрации к притоку (tout = m/Fout), химическое разрушение (tc = m/L), и осаждение (td = m/D).

$$\frac{1}{\tau} = \frac{1}{\tau_{out}} + \frac{1}{\tau_c} + \frac{1}{\tau_d}$$

Анализ химического времени жизни газов является более точным методом, в отличие от динамического времени жизни при использовании которого в химических транспортных моделях может возникать эффект малой разности больших величин. Стоки Fout, L, и D являются пропорциональными массе вещества внутри бокса (чем больше массы, тем больший сток возможен). В этом случае время жизни является независимым от инвентория X в боксе. Рассматривая, например, бокс с хорошо перемещанным веществом с размерами l_x, l_y, l_z переносимым ветром со скоростью U в направлении x. Пусть r_X представляет среднюю массу концентрации X в боксе. Масса X в боксе равна $r_X l_x l_y l_z$, а масса стока X из бокса в единицу времени равна $r_X U l_y l_z$, таким образом tout можно рассчитать как

$$\tau_{out} = \frac{m}{F_{out}} = \frac{\rho_X l_x l_y l_z}{\rho_X U l_y l_z} = \frac{l_x}{U}$$

В качестве другого примера, рассмотрим химический сток для газа X с константой скорости k_c. Скорость химического стока равна L = k_{cm} таким образом t_c является обратной величиной k_c:

$$\tau_c = \frac{m}{L} = \frac{1}{k_c}$$

Мы можем обобщить определение констант скорости для определения скорости разрушения газа к притоку ($k_{out} = 1/tout$) или стоку ($k_d = 1/t_d$). Таким образом мы определяем общюю константу скорости стока $k = 1/t = k_{out} + k_c + k_d$ для удаления газа X из бокса:

$$F_{out} + L + D = (k_{out} + k_c + k_d)m = km$$

или,

$$T = \frac{n}{P - Ln} = \frac{n}{V\frac{\partial n}{\partial y} + U\frac{\partial n}{\partial x} + W\frac{\partial n}{\partial z}}$$

где L – разрушение газа путем химического взаимодействия или осаждения, P – продукция газа, n – концентрация данного газа.

Результаты создания механизмов химической трансформации токсичных газов

Среди поверхностных газов первого типа, т.е. являющихся токсичными по своим свойствам, можно выделить угарный газ, метан, углеводороды неметановой группы (этаны, бутаны, ацетоны и др.) пары кислот (соляной, серной, фторовой и др.) сернистые газы (сероводород, двуокись серы) и окислы азота [Dentener, 2006].

Разрушение токсичных газов химическими составляющими поверхностного происхождения может происходить как в результате прямых химических реакций с токсичными примесями, так за счет прерывания приведенных выше цепочек образования атмосферного озона [Hofzumahaus et al., 2008]. В этом ряду особую роль играют водородные и азотные составляющие, которые могут формировать растворимые в облаках составляющие, выводимые из атмосферы с облаками и осадками [Lelieveld, 2006]:

$$HO_2 + HO_2 \rightarrow H_2O_2 + O_2$$

$$NO_2 + OH + M \rightarrow HNO_3 + M$$

Перекись водорода H_2O_2 и пары азотной кислоты HNO_3 легко растворяются в воде, в результате чего выводятся из атмосферы с осадками.

Среди газов, способствующих формированию вторичных токсичных составляющих, имеющих атмосферное происхождение, прежде всего, следует выделить примеси, влияющие на образование приземного озона. Среди подобных газов основную роль играют окислы азота и углеводороды метановой и неметановой групп [Simpson, 1993].

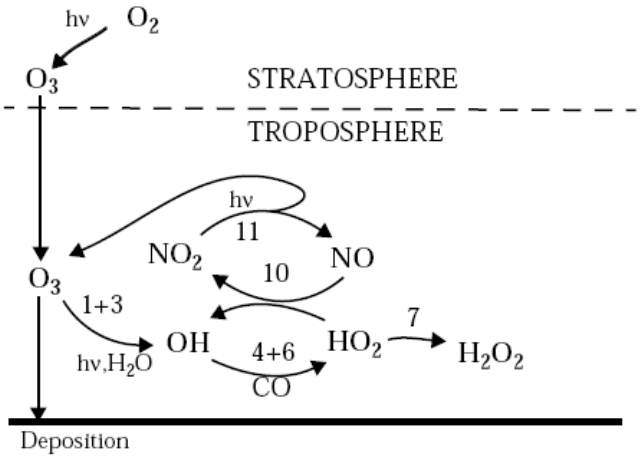


Рис. 4. Механизм химического взаимодействия O3-HOx-NOx-CO в тропосфере

Окисление в тропосфере является особо важным, т.к. тропосфера содержит большую часть массы всей атмосферы (около 85%), а также, потому что газы попадают в атмосферу с земной поверхности, т.е. сначала в тропосферу, а только потом могут переноситься в стратосферу и выше.

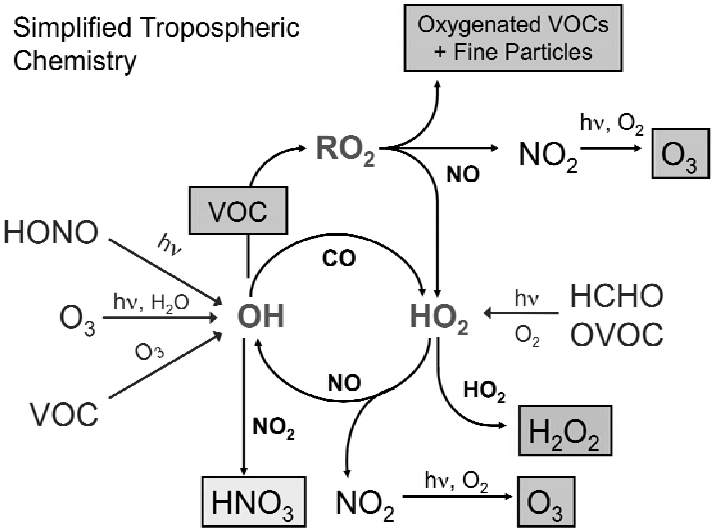


Рис. 5. Упрощенная схема химии тропосферы [Jacob, 1999]

Газ, содержащий больше всего окислителя – молекулярный кислород, является практически химически инертным, поэтому мало вносит в окислительные свойства атмосферы. С середины 1950х годов стало известно, что гидроксильный радикал OH является сильным окислителем. По своим химическим свойствам OH быстро реагирует с большинством из не радикальных газов и

особенно реактивен с молекулами, содержащими H, образуя водяной пар. Продукция OH в атмосфере происходит в результате реакции водяного пара с возбужденным атомарным кислородом [Seinfeld, 1998]. Основная реакция в ходе которой генерируется возбужденный атомарный кислород в тропосфере, который при дальнейшей реакции с водой даёт радикал гидроксила выглядит следующим образом:

$$O_3 + h\nu \rightarrow O_2 + O$$

$$O + H_2O \rightarrow 2OH$$

Гидроксил-радикал является ключевым в химии атмосферы, как инициатор окисления углеводородов в атмосфере.

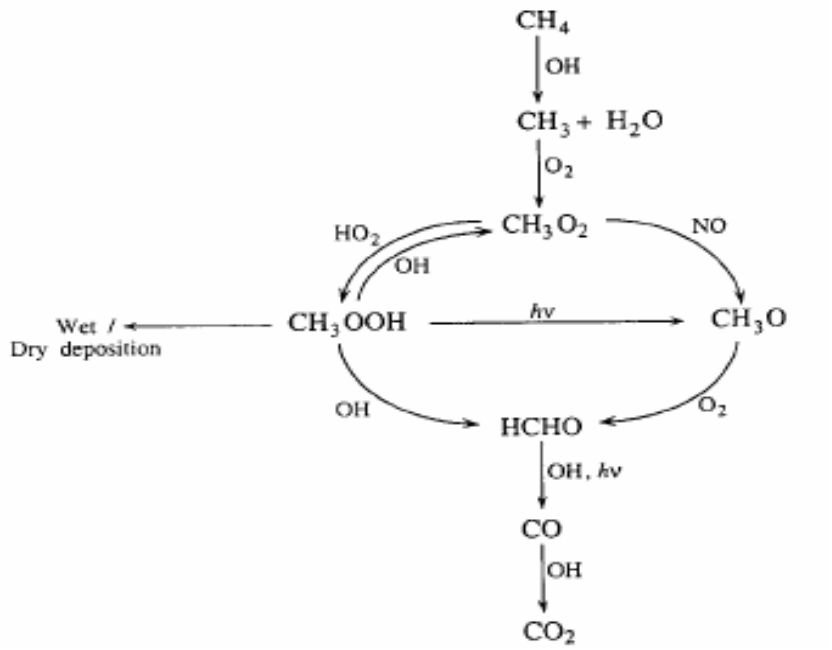


Рис. 6. Цикл окисления метана в атмосфере

Критичным для производства OH является образование атомарного кислорода – O. Довольно долго предполагалось, что продукция O в тропосфере является пренебрежимо малой из-за почти полного поглощения жесткой УФ радиации стратосферным озоном в УФ-B и УФ-C спектральных диапазонах. Полагалось, что окисление газов с поверхностным источником, таких как CO и CH_4, требует переноса в стратосферу, где достаточно OH с последующими реакциями [Lelieveld, 2006].

$$CO + OH \rightarrow CO_2 + H$$

$$CH_4 + OH \rightarrow CH_3 + H_2O$$

Этот механизм подразумевал долгое атмосферное время жизни CO и CH_4, т.к. воздуху требуется время для переноса из тропосферы в стратосферу, а стратосфера содержит только около 15% общей массы атмосферы. Исходя из этих положений, в середине XX века предполагалось, что накопление CO в тропосфере выбрасываемое двигателями внутреннего сгорания скоро станет глобальной проблемой загрязнения воздуха. Однако в начале 70х годов было обнаружено, что достаточное количество OH в действительности образуется в тропосфере в результате фотолиза озона, что приводит к значительному окислению таких газов как CO и CH_4 еще в тропосфере.

$$CH_4 + OH \rightarrow CH_3 + H_2O$$

Тогда как при окислении атмосферного метана поверхностного происхождения может формироваться до пяти молекул озона в результате цепочки реакций

$$\text{net: } CH_4 + 10O_2 \rightarrow CO_2 + H_2O + 5O_3 + 2OH$$

Таким образом, в присутствии азотных радикалов имеющие токсичные свойства метан и угарный газ существенно ухудшают токсичную обстановку в атмосфере за счет продукции значительного количества молекул озона.

Окисление CO при помощи OH приводит к появлению атома водорода, который в свою очередь быстро соединяется с O_2:

$$CO + OH \rightarrow CO_2 + H$$

$$H + O_2 + M \rightarrow HO_2 + M$$

$$CH_4 + OH \rightarrow CH_3 + H_2O$$

Возникший таким образом HO_2 продуцирует пероксид водорода, который разлагается в реакции фотолиза:

$$HO_2 + HO_2 \rightarrow H_2O_2 + O_2$$

$$H_2O_2 + h\nu \rightarrow 2OH$$

$$H_2O_2 + OH \rightarrow HO_2 + H_2O$$

Далее:

$$HO_2 + NO \rightarrow OH + NO_2$$

$$NO_2 + h\nu \rightarrow NO + O$$

$$O_2 + O \rightarrow O_3$$

В итоге можно обобщить цепочки реакций до:

$$CO + 2O_2 \rightarrow CO_2 + O_3$$

«Долгоживущие» газы CO и метан могут переноситься в тропосферу 5–10 лет. Они разрушаются главным образом химическим способом в атмосфере, а именно окислением гидроксильным радикалом, играя при этом основную роль при контроле концентраций OH.

Выбросы CO являются, по сути, следствием процессов неполного сжигания продуктов горения в двигателях, котельных, неконтролируемого сжигания мусора, металлоплавильных работ. Пероксид водорода хорошо растворим в воде, и вымывается из атмосферы в течение недели. Также газ может подвергаться фотолизу или вступать в реакцию с OH:

$$H_2O_2 + hv \rightarrow 2OH$$

$$H_2O_2 + OH \rightarrow HO_2 + H_2O$$

В результате первой реакции образуется OH, в то время как вторая производит дополнительный источник OH. В присутствии высокой концентрации NO, альтернативной реакцией с HO_2 является:

$$HO_2 + NO \rightarrow OH + NO_2$$

В результате данной реакци образуется 3 дополнительные молекулы OH, усиливающие окислительные свойства тропосферы.

Данная цепочка реакция описывает путь образования озона, в котором окисление CO кислородом каталитируется химическим семейством HOx (HOx = H + OH + HO_2) и окислами азота NOx [Kleinman, 1994]:

$$CO + OH\ (O_2) \rightarrow CO_2 + HO_2$$

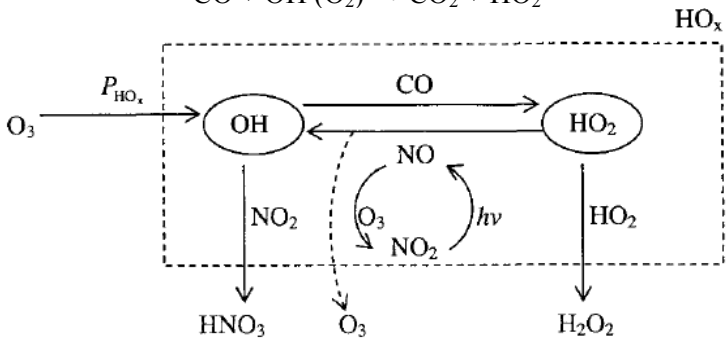


Рис. 7. Схема реакций вовлеченных в цикл окисления окиси углерода

В результате атмосферного окисления окиси углерода может формироваться молекула озона в результате цепочки реакций:

$$CO + OH \rightarrow CO_2 + H$$

$$H + O_2 + M \rightarrow HO_2 + M$$

$$HO_2 + HO_2 \rightarrow H_2O_2 + O_2$$

$$H_2O_2 + hv \rightarrow 2OH$$

$$H_2O_2 + OH \rightarrow HO_2 + H_2O$$

$$HO_2 + NO \rightarrow OH + NO_2$$

$$NO_2 + hv\ (O_2) \rightarrow NO + O_3$$

$$CO + OH\ (O_2) \rightarrow CO_2 + HO_2$$

Суммарная реакция:

$$CO + 2O_2 \rightarrow CO_2 + O_3$$

Соединения азота, поступающие в атмосферу от объектов АТК, представлены в основном NO и NO_2. Выделяемый в атмосферу моноксид азота под воздействием солнечного света интенсивно окисляется атмосферным кислородом до диоксида азота. Кинетика дальнейших превращений диоксида азота определяется его способностью поглощать ультрафиолетовые лучи и диссоциировать на моноксид азота и атомарный кислород в процессах фотохимического смога [Kleinman, 1994]. Окислы азота (NO и NO_2) являются ключевыми элементами окислительных процессов в атмосфере. От их концентрации зависит содержание свободных радикалов и интенсивность стока органических соединений. При высоких концентрациях (несколько десятков ppbv) они оказывают прямое негативное воздействие на здоровье человека.

Углеводороды неметановой группы могут способствовать формированию озона по сходной с метановой цепочкой реакций, при этом может образовываться до двух молекул озона при окислении одной молекулы углеводорода [JPL, 2003]. Если обозначить углеводород неметановой группы как RH, то схема его окисления будет выглядеть как

$$CH_3CHO + OH \rightarrow CH_3CO + H_2O$$

$$CH_3CO + O_2 + M \rightarrow CH_3C(O)OO + M$$

$$CH_3C(O)OO + NO_2 + M \rightarrow PAN + M$$

$$PAN \rightarrow CH_3C(O)OO + NO_2 \text{ (тепло)}$$

$$\text{net: } RH + 4O_2 \rightarrow R\,CHO + 2O_3 + H_2O$$

Углеводороды в атмосфере подвергаются окислению и полимеризации, взаимодействуя с другими атмосферными загрязнениями. При этом образуются перекиси, свободные радикалы, соединения с оксидами азота и серы [Jenkin et al, 2003].

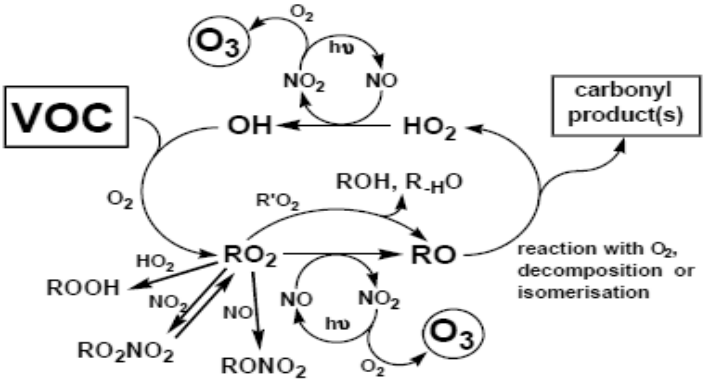


Рис. 8. Схематичное представление перехода ЛОС в первичные продукты

В свободной атмосфере сернистый газ (SO_2) выбрасывается с поверхности земли в результате индустриальной деятельности и через некоторое время окисляется до сернистого ангидрида (SOз) или вступает во взаимодействие с другими соединениями, в частности углеводородами [Dentener et al, 2006]. Окисление сернистого ангидрида в серный происходит в свободной атмосфере при фотохимических и каталитических реакциях. В обоих случаях конечным продуктом является аэрозоль или раствор серной кислоты в дождевой воде. Сероводород и сероуглерод при взаимодействии с другими загрязнителями подвергаются в свободной атмосфере медленному окислению до серного ангидрида.

$$SO_2 + OH + M \rightarrow HSO_3 + M$$

$$HSO_3 + O_2 \rightarrow SO_3 + HO_2 \text{ (быстро)}$$

$$SO_3 + H_2O + M \rightarrow H2SO_4 + M \text{ (быстро)}$$

Время жизни PAN в реакции около часа при температуре 295 K и около месяца при температуре 250 K. В нижней тропосфере NOx и PAN обычно находятся в химическом равновесии. В средней и верхней тропосфере PAN может переноситься на большие расстояния и разрушаться с образованием NOx далеко от его источника, как показано на Рис. 9.

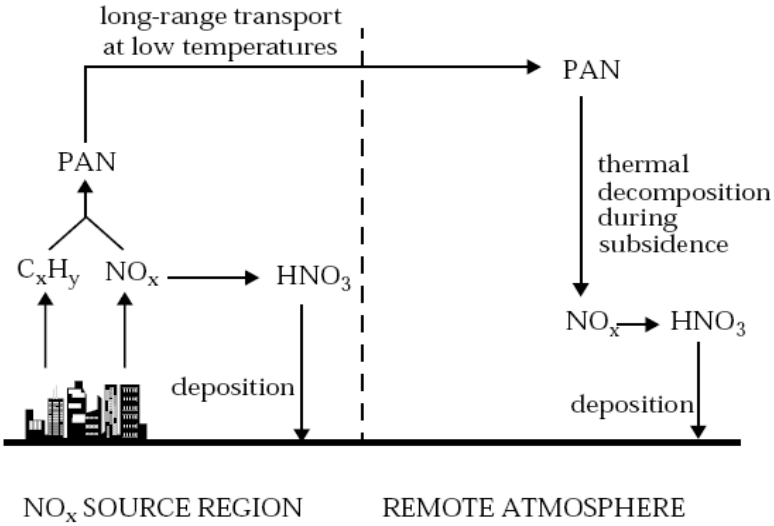


Рис. 9. PAN как резервуар для крупно-масштабного переноса NOx в тропосфере.

Измерения концентраций PAN за последние десятилетия показали, что крупномасштабный перенос в высоких широтах играет критическую роль во влиянии антропогенных источников на содержание окислов азота в глобальной тропосфере. PAN является одним из органических нитратов, образовавшихся при окислении углеводородов в присутствии больших концентраций окислов азота. Другие образующиеся нитраты не имеют значимых времен жизни.

Заключение

В данной работе приводится описание разработанного фотохимического механизма в боксовой модели трансформации токсичных газов атмосферы. На первом этапе боксовая модель BAQM, используя в качестве входных параметров данные сборника JPL [2003], составляет всевозможные цепочки реакций, удовлетворяющие требованию сохранения газов, вступающих и образующихся в результате цикла реакций. На втором этапе алгоритм производит сравнение скоростей реакций, входящих в каталитические циклы со скоростью реакции прямого разрушения газов для различных диапазонов характерных для атмосферы температур, влажности, потоков солнечной радиации при различных зенитных углах солнца и содержания основных атмосферных газов. На третьем этапе производится выделение каталитических циклов, учет которых необходим для правильного описания процессов разрушения газов в атмосфере.

Помимо объективного рассмотрения всей совокупности важных для озона химических реакций, разработанный алгоритм кардинально упрощает процесс изменения используемой химической схемы и параметров химических реакций, т.к. не требует внесения изменений в программные блоки модели. Процесс изменений, необходимость которого возникает по мере получения новых лабораторных данных о кинетике важных для атмосферы реакций, заключается в изменении параметров и, при необходимости, числа реакций в учитываемом механизме.

Для правильного рассмотрения процессов каталитического разрушения озона в атмосфере Земли, в комплекс модели газового состава BAQM необходимо включить следующие каталитические циклы и газовые составляющие:

$$NOY, OP, OD, O_3, NO, NO_2, NO_3, HNO_3, SO_2, CO, CH_4, CH_5O, HO_2, H_2O_2, H_2*,$$

$$H_2SO_4, HO, сера, CH_3O_2, CH_3, CH_3OOH, Cl, HCl, Br, BrO, N_2*, O_2*, M*, H_2O*$$

Применение химических механизмов в моделях позволяет решать целый ряд научно-исследовательских задач, таких как изучение трансформации экологически важных примесей в приземном слое атмосферы, реализация контроля за качеством воздуха и его изменчивостью, а также контроль загрязнения почвы с учетом обмена химически активными газами между атмосферой и подстилающей поверхностью и обратных связей между процессами в атмосфере и в приповерхностном слое подстилающей поверхности.

Современные тенденции ведут к значительному упрощению химических механизмов, но с условием сохранения точности описания фотохимических процессов в атмосфере. Современные химические механизмы совершенствуют путем добавления модулей параметризации процессов гетерогенной химии, взаимодействия газов и атмосферного аэрозоля, образования вторичных загрязнителей и т.д.

Литература

1. *Еланский Н.Ф.* Мониторинг атмосферы: вклад России // Наука в России. 2004. № 6. С. 20–26.
2. *Chang M., D. Hartley, C. Cardelino,* W.-L. Chang, Inverse modeling of biogenic emissions, Geophys. Res. Lett., 23 (1996), p. 3007.
3. *Dentener, F., et al*. (2006), Nitrogen and sulfur deposition on regional and global scales: A multimodel evaluation, Global Biogeochem. Cycles, 20, GB4003, doi:10.1029/2005GB002672.
4. *Gery, M.W., G.Z. Whitten, J.P. Killus, and M.C. Dodge.* 1989: A Photochemical Kinetics Mechanism for Urban and Regional Scale Computer Modeling. J. Geophys. Res., 94, 925–956.
5. *Hofzumahaus A., Forschungszentrum J.,* Germany New Chemistries – Evidence From Field Experiments Atmospheric Chemical Mechanisms Davis, December 10–12, 2008
6. *Jacob D.,* Introduction to Atmospheric Chemistry, Princeton University Press,1999
7. *Jenkin ME*, Saunders SM, et al. (2003). "Protocol for the development of the Master Chemical Mechanism, MCM v3 (Part B): tropospheric degradation of aromatic volatile organic compounds." ATMOSPHERIC CHEMISTRY AND PHYSICS 3: 181–193.
8. JPL Publication 02-25 “Chemical Kinetics and Photochemical Data for Use in Atmospheric Studies” Evaluation Number 14,NASA Panel for Data Evaluation: Jet Propulsion Laboratory Pasadena, California, 2003.
9. *Kleinman L.* Low and high NOx tropospheric photochemistry, J. Geophys. Res.,99 (1994), pp. 16831–16838.
10. *Lelieveld J.* Watching over tropospheric hydroxyl (OH), Atmos. Env., 40 (2006), pp. 5741–5743.
11. *Pielke R.,* Mesoscale Meteorological Modelling, Academic Press, 1984
12. *Seinfeld, J.H.* Atmospheric Chemistry and Physics / J.H. Seinfeld, S.N. Pandis // Wiley Interscience. 1998. P. 22–26.
13. *Simpson, D., Andersson-Sköld, Y., and Jenkin, M. E.,* 1993, Updating the chemical scheme for the EMEP MSC-W oxidant model : current status, Norwegian Meteorological Institute, EMEP MSC-W Note 2/93.
14. *Stockwell, W. R.* A new mechanism for regional atmos-pheric chemistry modeling / W. R. Stockwell, F. Kirchner, M. Kuhn // J. Geophys. Res., 102, 25,847–825,879. 1997. P. 20–21.
15. *Stull R.* An Introduction to Boundary Layer Meteorology, Kluwer Academic Publishers, 1988

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.3.1 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственный контракт № П2190 от 09 ноября 2009 г.) по направлению «Геохимия»

Ю.В. Гаврилова, С.П. Смышляев, А.Г. Махура

МОДЕЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРУПНЫХ ГОРОДОВ НА РЕГИОНАЛЬНЫЕ АСПЕКТЫ ПОГОДЫ

Y.V. Gavrilova, S.P. Smyshlyaev, A.G. Mahura

A MODEL STUDY OF THE MEGACITIES EFFECTS TO THE REGIONAL ASPECTS OF WEATHER

В настоящем исследовании были произведены оценки пространственного и временного изменения метеорологических величин (температуры воздуха на высоте 2м и скорости ветра на высоте 10 м.) в результате влияния термических и динамических урбанизационных эффектов на примере крупного промышленного города Санкт-Петербург (Россия). Термические и динамические эффекты урбанизации включали в себя увеличение эффективного параметра шероховатости и добавление антропогенных потоков тепла. Модельные эксперименты проводились с использованием региональной модели численного прогноза погоды Enviro-HIRLAM (Environment – High Resolution Limited Area Model) с горизонтальным разрешением 1.4 км. Анализировалась отдельно взятая синоптическая ситуация (30,31 января 2009 г.) с низкими скоростями ветра и наличием антициклонической циркуляции. Суточный ход метеорологических величин анализировался путем сравнения с результатами наблюдений, как в Санкт-Петербурге, так и в его пригородах.

Ключевые слова: региональная модель численного прогноза погоды, антропогенные потоки тепла, параметр шероховатости, температура воздуха, скорость ветра.

Estimations of spatial and temporal changes of meteorological variables (2m temperature & 10m wind) due to influence of thermal and dynamical factors of highly urbanized megacity Saint-Petersburg (Russia) are done in this investigation. Thermal and dynamic effects of urbanisation included anthropogenic heat fluxes and roughness increasing. Modeling experiments were done using regional NWP model Enviro-HIRLAM (Environment - High Resolution Limited Area Model) with horizontal resolution 1.4 km. Separately taken synoptic situation (on January, 30,31th, 2009) with low speeds of a wind and presence of anticyclonic circulation was analyzed. The simulation results were compared with observations at urban/ sub-urban synoptical stations.

Keywords: regional numerical prediction model, anthropogenic heat fluxes, roughness, temperature, wind velocity.

Города – неотъемлемая часть лика Земли. Они занимают всего лишь 2 % площади суши, но потребляют 3/4 всех мировых ресурсов [Голубчиков, 2001]. В настоящее время наблюдается интенсивный прирост населения планеты, а также усиливается приток людей в крупные города в связи с изменением экономической и социальной ситуации в мире. Урбанизация – результат и фактор развития, поскольку в компактном размещении объектов промышленности и инфраструктуры заложен значительный общественный интерес, дающий населению широкий доступ к образованию, здравоохранению, социальным услугам

и др. Взаимосвязь урбанизации и состояния окружающей природной среды обусловлена рядом факторов в сложной системе социально- экономического развития и взаимодействия общества и природы. Измененный ландшафт, наличие большого количества общественного и частного транспорта, активная деятельность промышленных предприятий приводят к ухудшению качества воздуха в локальном масштабе, но также в региональном и глобальном масштабах.

В России основными центрами с высокой концентрацией населения, являются города, такие как Москва, Санкт-Петербург, Екатеринбург, Новосибирск, Казань, Челябинск. Все эти города-миллионеры являются так же крупнейшими промышленными центрами.

В последние годы интерес к проблеме влияния мегаполисов на погоду, качество воздуха, региональный и глобальный климат существенно возрос. В Европе проводятся многочисленные исследования по этому вопросу. Результаты исследовательских работ по Копенгагену, Мальмо [Mahura et al, 2008], Марселю [Martilli et al, 2002] и др. показали, что урбанизационные эффекты оказывают существенное влияние на метеорологические величины, тем самым возникает необходимость включения таких эффектов не только в исследовательские, но и в оперативные модели численного прогноза погоды, что позволит существенно улучшить качество прогноза. Санкт-Петербург является одним из высоко урбанизированных городов с высокой плотностью населения и хорошо развитой промышленностью. Соответственно урбанизированные эффекты, такие как промышленные и бытовые выбросы газов, аэрозолей, измененный ландшафт, антропогенные потоки тепла оказывают влияние на формирование процессов погоды.

Настоящая исследовательская работа посвящена оценке влияния изменчивости антропогенных потоков тепла и эффективного параметра шероховатости в пределах крупного промышленного города Санкт-Петербурга на метеорологические условия, как первый шаг для учета эффектов урбанизации в интегрированных моделях численного прогноза погоды – изменения качества воздуха.

Методология

Наиболее перспективным методом исследования метеорологических особенностей и загрязнения атмосферы крупных городов является метод физико-математического моделирования, применение которого позволяет давать теоретическое обоснование получаемым закономерностям и прогнозировать метеоусловия и загрязнения атмосферы города, уточняя прогноз фоновых значений метеоэлементов и концентраций примеси.

В данной работе была использована региональная модель численного прогноза погоды Enviro-HIRLAM (Environmental HIgh Resolution Limited Area Model). Выбранная модель имеет структуру вложенных сеток, что позволяет рассмотреть урбанизированные эффекты более детально. Самая грубая сетка T15 имеет разрешение 15 км. Она охватывает всю Европу, часть Африки и

Северной Америки. Начальные данные модель получает из Европейского центра с интервалом каждые 6 часов. Вложенная в неё сетка уже имеет разрешение 5 км и начальными данными для неё являются выходные данные с модели T15. Для рассмотрения городских эффектов используется сетка более высоким разрешением 1.4 км и начальными для неё условиями являются выходные данные с модели S05[Xiaohua et al, 2005]. Благодаря высокому разрешению модели появляется возможность учета мелкомасштабных процесссов, ранее учитываемых как подсеточные, в региональных мезомасштабных моделях. Так же одной из особенностей данной модели является то, что в ней используется вращающаяся сферическая система координат. Все пространственные производные представляются на повернутой сфере. Поворот сферы осуществляется путем смещения южного полюса Земли в точку с координатами POLON =10º в.д. POLAT= 40º ю.ш. Выбранная область моделирования имеет 144 точки по широте и 170 по долготе.

В оперативной версии модели используется гибридная вертикальная координата, полунеявный Лагранжев подход к интегрированию уравнений. Физические параметризации модели включают в себя: параметризацию турбулентности CBR на основе решения уравнения баланса энергии турбулентных пульсаций, схемы конденсации, микрофизики облаков и конвекции STRACO, и др. на основе подхода «поток массы», радиационную схему и параметризацию гравитационных волн, схему обмена атмосферы с подстилающей поверхностью ISBA [Xiaohua et al, 2005; Unden et al, 2002].

Для того чтобы рассматривать урбанизационные эффекты, в модель был включен городской модуль (DMI module)[Baklanov et al, 2005]. Основным преимуществом этого модуля это эффективность с точки зрения использования компьютерного времени. Пограничный слой над городскими областями разделен на два/три подслоя. Один подслой включает в себя так называемый слой шероховатости (включающий логарифмический слой), где может использоваться теория MOST с некоторыми дополнениями для учета именно городской области. Второй подслой, где условия теории MOST не выполняются, рассматривается новая параметризация для профиля ветра.

Этот модуль включает алгоритмы расчета следующих параметров на каждом шаге, для каждой ячейки сетки имеющей городские особенности [Mahura et al,2005; Zilitinkevich,2005; Grimmond,1999]:

1. Используя классификацию земель, включает хотя бы один или несколько типов городского класса.
2. Определяет высоту смещения для городского района
3. В зависимости от устойчивости атмосферы производится расчет эффективного параметра шероховатости.
4. Благодаря использованию классификации земель, производит расчет антропогенных потоков тепла.
5. Корректировка значений альбедо для урбанизированных поверхностей.
6. Расчет профилей ветра внутри городского слоя.

Адаптировав модель к выбранному региону (в частности к городу Санкт-Петербург и его окрестностям) были проведены эксперименты, с запуском модели на 48 часов. Эксперименты проводились для зимнего периода года, поскольку порядок значений антропогенных потоков тепла в этот период года в десятки раз выше, чем естественных потоков за счет центрального отопления зданий, для дней с определенной синоптической ситуацией. Отметим, что наиболее яркий эффект влияния антропогенных потоков тепла достигается при антициклонической системе циркуляции с низкими скоростями ветра. Величина включенных в модель антропогенных потоков тепла при расчете менялась от 50 до 200 Вт/м^2, при этом значения естественных потоков тепла в этот период года составляет порядка 15 Вт/м^2. Среднее значение эффективного параметра шероховатости для городских районов составляет около 2 м. и более, в зависимости от структуры города, так как Санкт–Петербург является городом с различным характером застройки, среднее значение параметра шероховатости будет равным 2 м., при этом величина данного параметра в естественной среде составляет 0,5 м. для лиственного леса. При выполнении экспериментов, в модель будут включаться рассматриваемые эффекты урбанизации, как по отдельности, так и при различном их комбинировании.

Синоптические условия

Основная роль антропогенных потоков тепла зависит от синоптической ситуации. Наиболее яркий эффект достигается при антициклонической системе с низкой циркуляцией ветра и наличием инверсии. Для выполнения работы были подобраны дни с использованием архивов данных Российского Государственного Гидрометеорологического университета, удовлетворяющие данным условиям.

30 января 2009 г. над выбранной областью исследования наблюдался антициклон, с давлением в центре 1040 Гпа. Санкт-Петербург находился на западной периферии антициклона, он малоподвижен и прибывал в стадии максимального развития. В этот день наблюдалось преимуществен юго-восточное направление ветра со скоростью 1- 3 м/с. В течение дня максимум температуры наблюдался в срок 00:00 часов (по Гринвичу) и равен –2.1 ºС, минимум наблюдался в срок 21:00 час (по Гринвичу) и был равен –7.8 ºС. В Санкт-Петербурге давление в течение дня увеличивалось от 1022.9 гПа в срок 00:00 часов (по Гринвичу) до 1031.8 гПа в срок 21:00 час (по Гринвичу). По результатам анализа температурного профиля можно сделать вывод, что в ночные часы, а именно в срок 00 часов, наблюдалась изотермия от поверхности земли до уровня 600 м. 31 января 2009 г. средняя скорость ветра составила 1–2 м/с. Максимальная температура воздуха –12.9 ºС в срок 00 часов (по Гринвичу), минимум –14.3 ºС. В срок 12 часов наблюдалась приземная инверсия до уровня 950 гПа, от этого уровня и до 770 гПа была изотермия. Представленные синоптические ситуации способствуют образованию задерживающих слоев, препятствующих вертикальному обмену теплом и влагой.

Результаты модельных экспериментов

В таблице 1 представлены расчетные результаты чувствительности температуры воздуха и скорости ветра к антропогенным потокам тепла. По сравнению с базовым вариантом модели в модифицированную версию были добавлены антропогенные потоки равные 200 Вт/м^2, такое значение является близким к максимальным оценкам для выбранного сезона в исследуемом регионе.

Таблица 1

Максимальная разница значений температуры воздуха и скорости ветра между базовым и модифицированным вариантом запуска модели при включении в нее антропогенных потоков тепла

		Температура воздуха (° С)		Скорость Ветра (м/с)	
Дата	Время(UTC)	100 W/m2	200 W/m2	100 W/m2	200 W/m2
30 января 2009 г.	0	1.3	1.97	1.98	3,28
	3	1.3	1.93	2.58	3.14
	6	0.88	1.22	2.46	2.3
	9	0.6	0.92	1.75	1.97
	12	0.52	0.69	1.35	1.63
	15	0.33	0.56	1.11	1.45
	18	0.44	0.65	1.09	1.4
	21	0.42	0.47	0.9	1.22
31 января 2009 г.	0	0.42	0.6	1	1.21
	3	0.48	1	0.93	1.34
	6	0.89	1.3	2.14	1.5
	9	1	1.39	2.07	3.24
	12	1.2	1.2	2.04	1.5
	15	0.8	1	1	2.34
	18	0.92	1.27	1.84	1.77
	21	1.24	1.47	2.1	2.39
1 февраля 2009 г.	0	1.36	2.11	2.06	2.14

30 января 2009 года максимальная разница между модифицированным/ базовым запуском равна 1.97 ºС, которая наблюдалась в срок 00 часов, минимум составил 0.47 ºС в срок 21 час.

31 января ситуация абсолютно противоположная, максимум наблюдался в срок 21 час и равен 1.47 º С, а минимум составил 0.6 ºС в срок 00 часов. Такому зеркальному отражению данного распределения максимумов и минимумов способствовала синоптическая ситуация. В ночные часы, а именно в срок 00 часов 30 января наблюдалась изотермия от поверхности земли до уровня 600 м, которая способствовала образованию задерживающих слоев, в результате чего мы видим максимальную разницу. В период с 00 часов 30 января до срока 3 часа 31 января наблюдалось резкое уменьшение температуры, разница составила 4 ºС. 31 января в срок 12 часов наблюдалась приземная инверсия до уровня 950 Гпа, от этого уровня и до 770 Гпа была изотермия, в результате чего мы видим максимальный эффект. Анализируя скорость ветра можно обнаружить что, максимум и минимум значения скорости ветра совпадает со сроками

максимумами и минимумами температуры составляет 3.28 м/с в срок 00 часов 30 января, минимум – 1.22 м/с в срок 21 час. 31 января минимальное уменьшение скорости ветра составило 1.21 м/с в срок 00 часов, 2.39 м/с – максимальное, в срок 21 час.

При запуске версии модели, в которой среднее значение антропогенных потоков тепла равно 100 Вт/м2. Максимальная разница температуры воздуха 30 января составила 1.3 ºС в срок 00 часов, 31 января максимум был достигнут в срок 21 час и равен 1.24 ºС, минимальная – 0.42 ºС, для каждого выбранного периода. Необходимо отметить, что с учетом классификации земель, основным источником антропогенных потоков тепла является центральный район города, что хорошо прослеживается при моделировании ситуации.

Для скоростей ветра максимум был равен 1.98 м/с в срок 00часов 30 января, минимум разницы составил 0.9 м/с. 31 января максимум уменьшения скорости ветра был равен 2.1 м/с. Максимальные и минимальные значения разницы скорости ветра также повторяют ход температуры, как и в предыдущем случае. Что позволяет сделать вывод о том, что антропогенные потоки тепла оказывают влияние и на циркуляцию. Потоки тепла меняют общий нагрев поверхности, уменьшая выхолаживание, соответственно скорость ветра падает. При уменьшении ветра, температура увеличивается.

В последние годы прирост населения в городах существенно возрос. Разрастаясь, города поглощают ближайшие окрестности, постепенно сливаясь друг с другом и образуя городские агломерации. С целью увеличить количество жилых помещений, но при этом занимаемая площадь должна быть минимальной, происходит строительство высотных зданий. Тем самым эффективный параметр шероховатости существенно возрастает. При изменении только значения параметра шероховатости до значения 1м, Максимальная разница для скорости ветра составила 2.4 м/с, минимальная 0.7 м/с. С уменьшением скорости ветра, температура воздуха увеличивается, связано это с уменьшением оттока тепла, максимальная разница между модифицированным и базовым вариантом для температуры воздуха составила 0.48 ºС.

При увеличении параметра шероховатости до 2 м, эффект более ярко выражен, скорость ветра уменьшилась по сравнению с базовым вариантом модели на 3 м/с., температура воздуха увеличилась на 0.65 ºС.

Поскольку в реальных условиях термические и динамические урбанизированные эффекты оказывают влияние одновременно, то были произведены запуски модели, при комбинировании всех рассматриваемых эффектов: значение альбедо равно 0.65, параметр шероховатости 2м, значение антропогенных потоков тепла – 200 Вт/м^{2,} а также 100 Вт/м^2 (рис. 1).

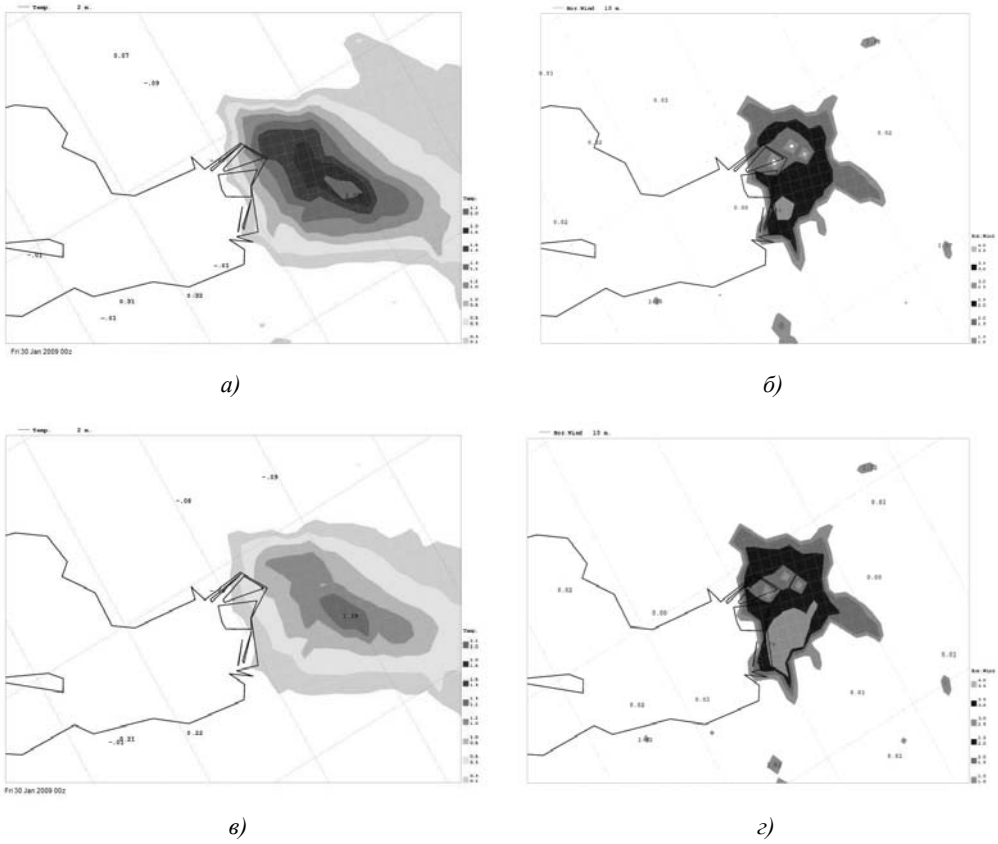


Рис. 1. Разница между базовым и модифицированным вариантом модели в срок 03 часа по Гринвичу 30 января 2009 года при комбинированном эффекте: *а–б* для температуры воздуха и скорости ветра соответственно при значении антропогенных потоков тепла = 200 Вт/м^2 ; *в–г* для температуры воздуха и скорости ветра соответственно при значении антропогенных потоков тепла = 100 Вт/м^2.

При таком совместном сочетании, максимальная разница температуры при добавлении антропогенных потоков тепла равных 200 Вт/м^2 составила 2. 09 ºС, что больше на 0.12 ºС при проведении экспериментов для версии модели, в которую включены были только антропогенные потоки тепла. Максимальная разница в ветре равна 2.6 м/с, что меньше на 0.7 м/с по сравнению с результатами некомбинированного эксперимента. При таком комбинировании, наблюдается нелинейный эффект, количественное изменение переходит в качественное изменение циркуляции.

При таком же комбинировании эффектов, но значения антропогенных потоков было равным 100 Вт/м^2 (рис. 1 *в–г*), максимальная разница температуры равна 1.39 ºС, что больше на 0.19 ºС по сравнению с максимумом, где добавлял-

ся только поток, равный 100 Вт/м^2 Максимум значения скорости ветра был равен 2.89 м/с, что больше на 0.2 м/с при таком же сравнении. Данное сочетание эффектов, привело к большему увеличению температуры воздуха, так же эффект уменьшения скорости ветра наиболее ярко выражен.

Таким образом, можно сделать вывод, что при выполнении модельных экспериментов, в которых значения исследуемых эффектов урбанизации являются максимальными для выбранного региона, прослеживается нелинейность процессов, при меньших значениях, рассматриваемые эффекты взаимодополняют друг друга, благодаря чему, чувствительность метеорологических параметров возрастает.

Верификация модели

Для того чтобы оценить насколько рассчитываемые в модели метеорологические параметры совпадают с результатами наблюдений, был произведен сравнительный анализ результатов измерения с результатами расчетов базового и модифицированного вариантов модели для Санкт-Петербурга (рис. 2 *а–б*).

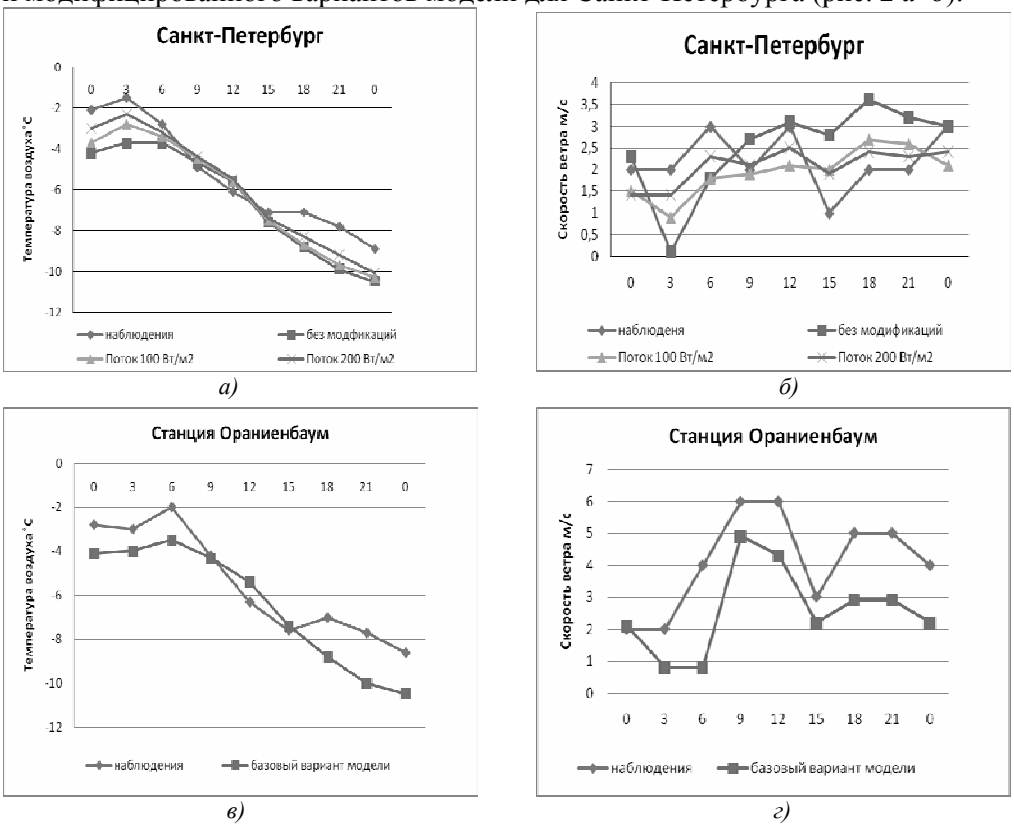


Рис. 2. Естественный и смоделированный суточный ход для температуры воздуха и скорости ветра соответственно *а–б* для Санкт-Петербурга; *в–г* для станции Ораниенбаум (пригород)

Наиболее близкими к реальным наблюдениям оказались расчеты модели при добавленных антропогенных потоков тепла, значение которых составило 200 Вт/м^2. параметр шероховатости был равным 2 м.

При неплохом, но не идеальном соответствии результатов моделирования и результатов наблюдения, включение эффектов урбанизации позволило улучшить соответствие результатов расчетов и измерений, как в скорости ветра, так и в температуре воздуха.

Так же было произведено сравнения результатов расчетов модели с результатами измерений для пригородов Санкт-Петербурга и неурбанизированных местностей. Анализ результатов измерений с результатами расчетов были выполнены для 9 станций таких как Ораниенбаум (рис. 2 *в–г*), Кронштадт, Волосово, Сосново, Озерки, Шлиссельбург, Выборг. Для пригородов, результаты моделирования, с включенным урбанизированными эффектами и без них совпадают, эффектов урбанизации нет, поэтому результаты базового варианта модели имеют хорошее соответствие с результатами наблюдений.

Заключение

Настоящая работа посвящена исследованию влияния изменчивости потоков тепла в пределах крупного промышленного города на метеорологические условия, как первый шаг учета эффектов урбанизации в интегрированных моделях численного прогноза погоды – изменения качества воздуха.

Получены следующие результаты:

1. Исследования чувствительности метеорологических параметров (температура воздуха, скорость ветра) к антропогенным потокам тепла и к параметру шероховатости показали, что наиболее существенные эффекты оказывали влияние в тот период времени, когда наблюдались слои инверсии или изотермии, что доказывает значимость синоптической ситуации.
2. Эффект влияния антропогенных потоков тепла на температуру связан с изменением скорости ветра. Максимальное уменьшение значения скорости ветра совпадает со сроками максимума увеличения температуры воздуха. Потоки тепла меняют общий нагрев поверхности, уменьшая выхолаживание, соответственно происходит уменьшение скорости ветра.
3. Увеличение эффективного параметра шероховатости приводит к уменьшению скорости ветра, поскольку сопротивление увеличивается, в то-же время происходит увеличение температуры воздуха, так как уменьшается отток тепла.
4. Результаты комбинированного учета исследуемых эффектов показали важность нелинейных эффектов и обратных связей. При выполнении модельных экспериментов, в которых значения исследуемых эффектов урбанизации являются максимальными (200 вт/м^2; 2 м), для выбранного региона прослеживается нелинейность процессов, количественное изменение переходит в качественное, при меньших значениях, рассматриваемые эффекты взаимодополняют друг друга, благодаря чему, чувствительность метеорологических параметров возрастает.

Общий вывод исследования – использование относительно простой схемы учета эффектов урбанизации позволяет улучшить результаты моделирования. Сравнивая полученные результаты урбанизированной версии модели с результатами наблюдений, можно увидеть, что включение эффектов урбанизации позволило улучшить соответствие результатов расчетов и измерений, как в скорости ветра, так и в температуре воздуха.

Литература

1. Голубчиков, С.Н. Экология крупного города (на примере Москвы) [Текст] / В. А. Гутников, И. Н. Ильина, А. А. Минин, Б. Б. Прохоров. – М.: Изд-во Пасьва, 2001. – 189 с.
2. Сладкопевцев, С.А. Региональная геоэкология России [Текст] – М.: Изд-во МосГУГиК, 2000. – 158 с.
3. Mahura, A. Verification of long-term DMI-HIRLAM NWP model runs using urbanization and building effect parameterization modules [Text] / C. Petersen, A. Baklanov, B. Amstrup, U.S. Korsholm, K. Sattler // HIRLAM Newsletter. – 2008. – № 53, – P. 50 – 59.
4. Martilli, A., Clappier, A., Rotach, M. W., 2002: An Urban Surface Exchange Parameterization for Mesoscale Models, Boundary Layer Meteorology 104, 261–304.
5. Xiaohua,Y. The DMI-HIRLAM upgrade in June 2004 [Text] / C. Petersen, B. Amstrup, B. S. Andersen, H. Feddersen, M. Kmit, U. Korsholm, K. Lindberg, K. Mogensen, B. H. Sass, K. Sattler, N. W. Nielsen // Technical Report – 2005. – № 09, – 34 P.
6. Unden, P., L. Rontu, H. Järvinen, P. Lynch, J. Calvo, G. Cats, J. Cuhart, K. Eerola, etc. 2002: HIRLAM-5 Scientific Documentation. December 2002, *HIRLAM-5 Project Report,* SMHI.
7. Baklanov, A. Approaches for urbanization of DMI-HIRLAM NWP model [Text] / A. Mahura, N.W. Nielsen, C. Petersen // HIRLAM Newsletter. – 2005. – № 49, – P. 61 – 75.
8. Mahura A., Leroyer S., Mestayer P., Calmet I., Dupont S., Long N., Baklanov A., Petersen C., Sattler K.,Nielsen N.W. 2005b: Large Eddy Simulation of Urban Features for Copenhagen Metropolitan Area.Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, Vol. 5, pp. 11183–11213.
9. Zilitinkevich, S., Baklanov, A., 2005: An analytical model of the mean-wind and the momentum flux profiles in the urban roughness layer. Ch. 3 in DMI Scientific Report #04-08, ISBN: 87-7478-510-9,pp. 42–46.
10. Grimmond, C.S.B., Oke, T.R. 1999a: Heat storage in urban areas: Local-scale observations and evaluation of a simple model. J. Appl. Meteor., 38, 922–940
11. Baklanov A., Mestayer, P., Clappier, A., Zilitinkevich, S., Joffre, S., Mahura, A., N.W. Nielsen, 2005a: On the parameterization of the urban atmospheric sublayer in meteorological models. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions, Vol. 5, pp. 12119–12176.
12. Baklanov, A. Effects of Urbanized Areas for NWP DMI-HIRLAM High Resolution Model Operational Runs [Text] / A. Mahura, C. Petersen, K. Sattler, N.W. Nielsen // J. Computational Technologies. – 2006. – № 11, – P.157 – 16
13. Baklanov, A., A. Rasmussen, B. Fay, E. Berge, and S. Finardi, 2002: Potential and shortcomings of numerical weather prediction models in providing meteorological data for urban air pollution forecasting. Water, Air and Soil Poll.: Focus, 2, Urban Air Quality – Recent Advances, pp. 43–60
14. Mahura A., Sattler K., Petersen C., Amstrup B., Baklanov A., 2005a: DMI-HIRLAM Modelling with High Resolution Setup and Simulations for Areas of Denmark. DMI Technical Report 05-12, 45 p.

Данное исследование выполнено с использованием региональной модели численного прогноза погоды Enviro- HIRLAM, которая была предоставлена Датским Метеорологическим Институтом (DMI).Автор выражает благодарность Северо-Западное УГМС за предоставление метеорологических данных для Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Данная *работа выполнена в рамках Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.», а также* при финансовой поддержке проектов NetFam (Nordic Network on Fine-scale Atmospheric Modelling), MEGAPOLI.

ОКЕАНОЛОГИЯ

Н.П. Смирнов, В.Н. Воробьев, В.В. Дроздов

ЦИКЛОНИЧЕСКИЙ ЦЕНТР ДЕЙСТВИЯ АТМОСФЕРЫ И ОКЕАНА В СЕВЕРНОЙ АТЛАНТИКЕ

N.P. Smirnov, V.N. Vorobyov, V.V. Drozdov

CYCLONIC CENTER OF ATMOSPHERE AND OCEAN ACTION IN NORTH ATLANTIC

В качестве индикаторов атмосферного центра действия использовались значения атмосферного давления в центре Исландского минимума и его широты и значения индекса Северо-Атлантического колебания, представляющего разность давлений между центрами Азорского максимума и Исландского минимума давления. Показателями интенсивности циклонической циркуляции вод в той же области Северной Атлантики и Северо-Европейского бассейна явились альтиметрические спутниковые данные, данные по температуре воды на стандартных разрезах и величины переноса воды и тепла на разрезах через основные проливы этого региона. Исследовались сезонные и многолетние изменения характеристик центров действия атмосферы и океана и связь между ними. В результате установлена высокая корреляционная связь между изменениями интенсивности циклонической циркуляции атмосферы и океана в Северной Атлантике и Северо-Европейском бассейне Северного Ледовитого океана как в течение года, так год от года. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что мы имеем дело с единой динамической системой, центром действия атмосферы и океана, который определяет состояние климата в различных областях этой системы.

Ключевые слова: циклонические центры действия атмосферы и океана, циркуляция атмосферы, климат, Исландский минимум давления.

The atmospheric pressure values at the centre of the Icelandic low and its latitude, the index of the North Atlantic oscillation, which represents the pressure difference between the centers of the Azores high and Icelandic low pressures, are used as the indicator of an atmospheric action centre. The altimetry satellite data, data on water temperature in the standard profiles and the size of the water and heat transfer along the profiles in the main straits of the region serve as intensity indices of the cyclonic water circulation in the same area of the North Atlantic and North-European Basin. Seasonal and multiyear changes in characteristics of the atmospheric action centres and the ocean and the relationship between them are studied. As a result, a high correlation has been established between changes in the cyclonic circulation intensity of the atmosphere and ocean in the North Atlantic and North-European basin of the Arctic Ocean,

both during the year and from year to year. The results obtained allow us to conclude that this is a single dynamic system, the center of action of the atmosphere and ocean, which determines the climate state in various areas of the system.

Key words: cyclonic centers of the atmosphere and ocean, atmospheric circulation, climate, Icelandic low.

Понятие о центрах действия атмосферы было выдвинуто Тейсеран-де-Бором еще в 1873 г. И во второй половине XX в. они стали активно изучаться, особенно в Северном полушарии [Абрамов, 1966; Мартынова, 1990; Смирнов, Воробьёв, Кочанов, 1998; Смирнов, Воробьев, 2002; Стехновский, 1962; Стехновский, Цветкова, 1972]. В Южном полушарии их изучение началось недавно [Смирнов, Саруханян, Розанова, 2004].

Понятие центров действия атмосферы и гидросферы впервые было дано в работе [Трешников и др., 1974], но почему-то не получила дальнейшего развития. Хотя вполне очевидно, что под всеми квазистационарными циклоническими и антициклоническими центрами действия атмосферы в океане существуют соответствующие круговороты вод. При этом квазистационарные центры действия атмосферы наблюдаются только над океаном, что подчеркивает их прямую связь. Поэтому эти системы циклонических и антициклонических круговоротов воздушных масс в атмосфере и вод в океане следует рассматривать как единые центры действия атмосферы и океана.

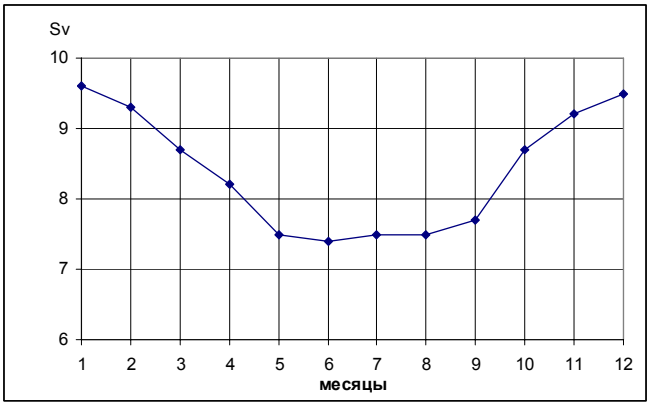
Первая попытка исследовать единую циклоническую систему в атмосфере и океане в регионе Северной Атлантики и была предпринята в настоящей работе.

Основная сложность исследования таких систем связана с океаном, где очень мало данных, позволяющих оценить изменения интенсивности циркуляции вод. Более всего данных можно найти по Северной Атлантике. Поэтому для исследования и была выбрана Северная Атлантика, где расположен Исландский минимум давления, с отрогом низкого давления до моря Лаптевых, представляющий гигантскую циклоническую вихревую систему, охватывающую всю Северную Атлантику и большую часть Северного Ледовитого океана [Смирнов, Воробьёв, Кочанов, 1998]. В соответствии с ней в океане наблюдается гигантский круговорот вод, начинающийся Северо-Атлантическим течением и далее Норвежским течением и его ответвлением, проникающим уже на глубине вплоть до Восточно-Сибирского моря. От северных же границ Восточно-Сибирского моря начинается трансарктический перенос вод и льдов через весь Арктический бассейн до пролива Фрама и далее Восточно-Гренландское течение, Западно-Гренландское и Лабрадорское, которое замыкает этот круговорот.

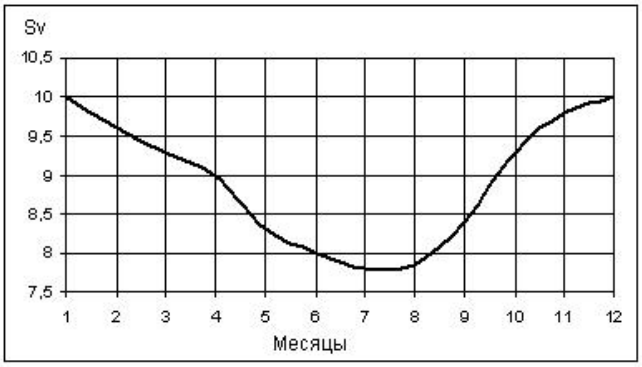
В качестве данных по океану использовались: альтиметрические данные [www.aviso.oceanobs.com; www.nodc.noaa.gov; www.podaac.jpl.nasa.gov], данные по температуре воды и данные расчетов потоков вод на отдельных разрезах и в проливах, соединяющих Атлантику с Северо-Европейским бассейном, и в проливе Фрама [Dickson, Meincke, Rhines, 2008].

Сезонные и многолетние колебания циркуляции вод в Северной Атлантике

На рис. 1 и 2 представлены сезонные изменения потока Атлантических вод в Северо-Европейский бассейн через Фареро-Шетландский пролив и общий поток вод в среднем с 1948 по 2005 г.



а



б

Рис. 1. Среднемесячные значения интенсивности потока атлантических вод, проникающих в Арктику через Фареро-Шетландский пролив (*а*) и общего потока вод (*б*), осредненные за период с 1948 по 2005 г.

Как видно из рис. 1, максимальный поток вод наблюдается в зимний период с ноября по февраль, а минимальный – летом с мая по август.

Следует сразу оговорить, что значения потока вод в отдельные годы могут заметно отличаться от приведенных средних значений. Например, в 2001 г. максимальные значения наблюдались в августе–сентябре, а минимум – даже в январе (рис. 2).

В такие годы происходит усиление потока вод вдоль западного побережья Исландии. Таким образом, анализ сезонной изменчивости потоков атлантических вод в Арктический бассейн выраженных в единицах вертикального обоб-

щенного объема (Sv) показал следующее: для сезонных значений интенсивности проникновения атлантических вод в Северо-Европейский и далее в Арктический бассейн свойственна значительная межгодовая изменчивость. Причем заметным колебаниям могут быть подвержены как сроки наступления экстремумов, так и амплитуды изменчивости значений.

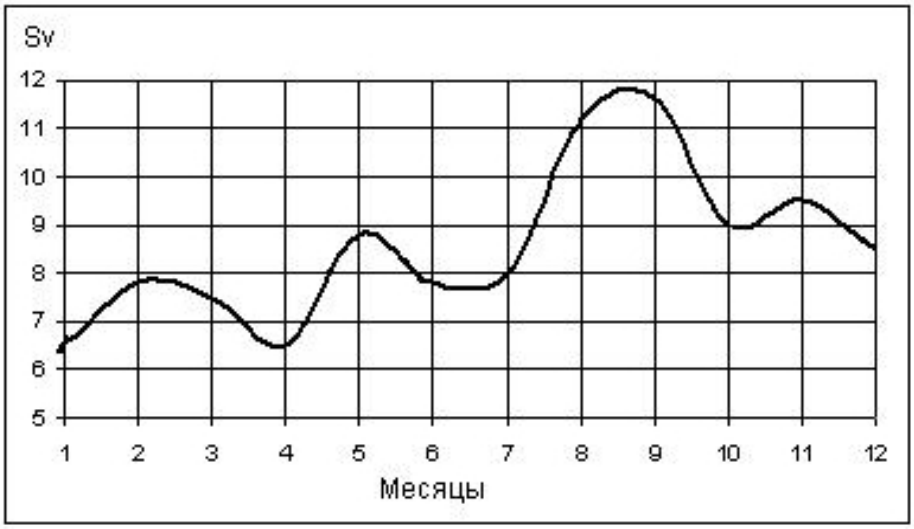


Рис. 2. Особенности среднемесячной изменчивости интенсивности общего потока Атлантических вод, проникающих в Арктику в 2001 г.

Однако средний поток вод за исследуемый период достигает максимума зимой, а минимума – летом, и только значения потока вод вдоль западного побережья Исландии имеют особенность. Их максимум наступает осенью, а минимум – весной.

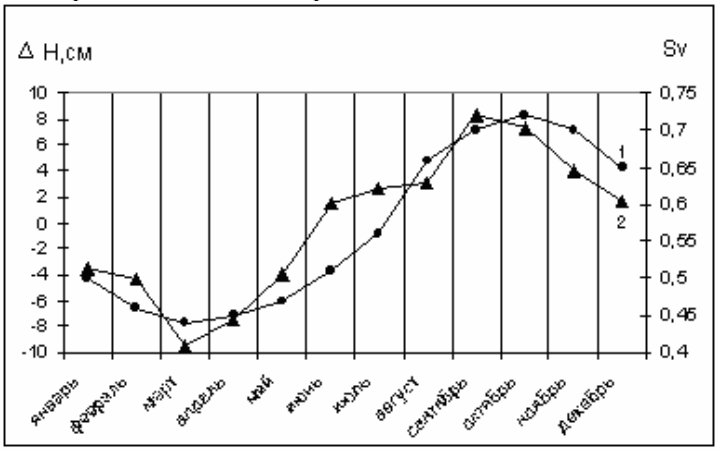
Проанализируем теперь характер связи между основными потоками атлантических вод и уровненным режимом океана в высокоширотных районах (рис. 3). Для этого используем сезонные данные о динамике уровня, полученные на основе спутниковой альтиметрии, осредненные за доступный период наблюдений с 1993 по 2008 г. Мы видим, что возрастанию интенсивности проникновения атлантических вод в Арктику вдоль западного побережья Исландии соответствует почти синхронное увеличение уровня океана в северной части Гренландского моря.

Рис. 3, *б* демонстрирует степень и характер связи между сезонными значениями самого мощного из рассматриваемых потоков атлантических вод, проходящим через Фареро-Шетландский пролив, и внутригодовым уровненным режимом на северной границе Северного моря.

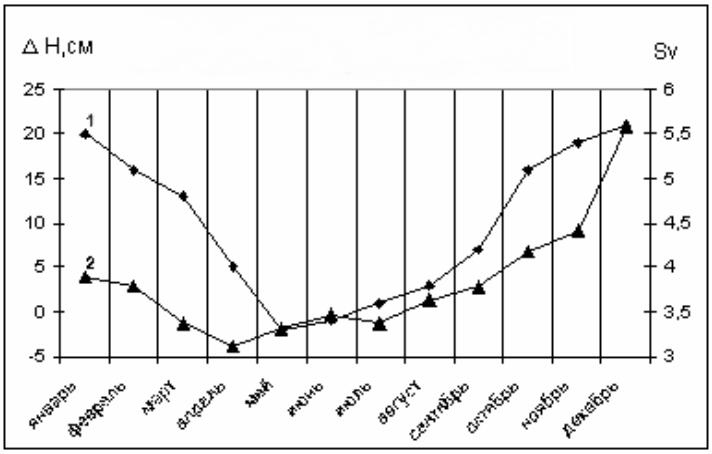
Таким образом, изменчивость уровня океана является вполне эффективным индикатором параметров его циркуляции и более широкое привлечение спутниковых наблюдений за динамикой уровненной поверхности позволит в даль-

нейшем детализировать наши представления о сезонном и межгодовом режиме, а также пространственной направленности важнейших течений региона.

Это может служить убедительным свидетельством адекватности использования альтиметрических данных в качестве показателей оценивающих циркуляцию вод в Северо-Атлантическом регионе.



а



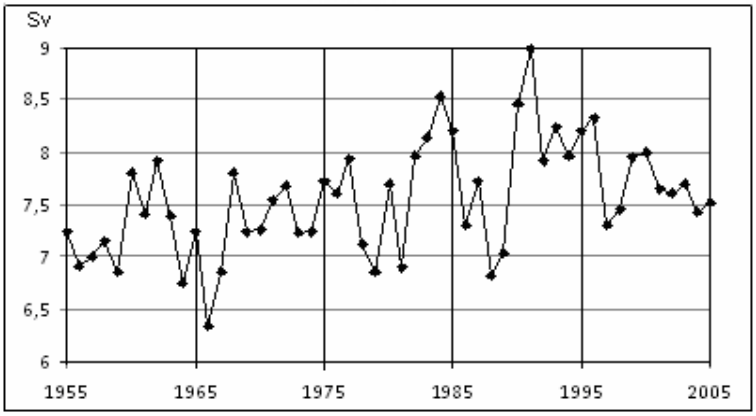
б

Рис. 3. Сравнение: *а* – среднемесячных значений интенсивности потока атлантических вод вдоль западного побережья Исландии (1) с изменениями уровня океана высокоширотном районе Гренландского моря (75,4 º с.ш., 0 º з.д.) (2) и *б* – среднемесячных значений интенсивности потока атлантических вод через Фареро-Шетландский пролив (1) с уровнем океана в северной части Северного моря (70 º с.ш., 6,7 º в.д.) (2)

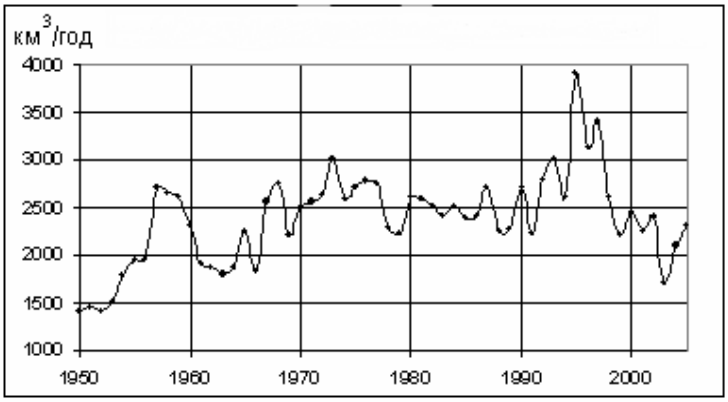
Анализ сезонных изменений температуры воды в сравнении с расходами воды не представляет смысла, поскольку они тесно связаны между собой. Наи-

более длинный ряд наблюдений температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» всегда рассматривался как индикатор усиления или ослабления потока Атлантических вод в Арктический бассейн. Именно с этой целью и выполнялся различными странами целый ряд температурных разрезов на пересечении основных океанических потоков.

На рис. 4 приведены значения потоков воды за год через Фареро-Шетландский пролив (атлантические теплые воды поступают в Северный Ледовитый океан), и поток холодных вод, поступающий из Арктического бассейна через пролив Фрама в Гренландское море.



а



б

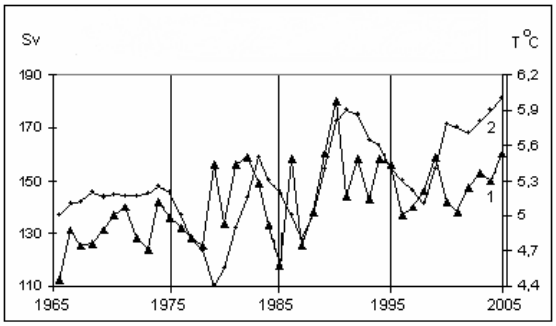
Рис. 4. Многолетняя динамика годового потока воды через Фареро-Шетландский пролив (*а*) и среднего годового потока пресных вод в Атлантику через пролив Фрама (*б*)

Из рисунка следует, что по сравнению с 50-ми годами прошлого века к середине 90-х годов потоки вод возросли как на север в Арктический бассейн, так и в обратном направлении из Арктического бассейна в Северную Атлантику.

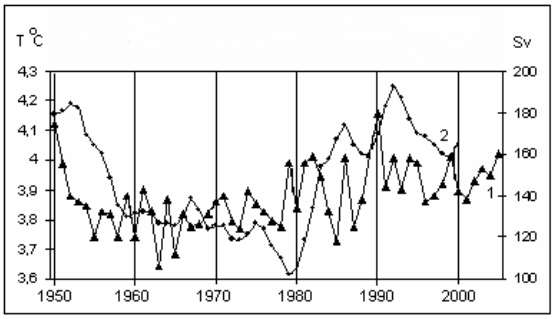
Таким образом, можно говорить об увеличении водообмена между Северной Атлантикой и Северным Ледовитым океаном в этот период. В конце 90-х годов прошлого столетия и начале нынешнего потоки вод через проливы заметно снизились, что свидетельствует об ослаблении водообмена между Северной Атлантикой и Северным Ледовитым океаном.

Увеличение, т.е. интенсификация, потока теплых атлантических вод на север сопровождалась и увеличением температуры воды в ядре атлантических водных масс на международных разрезах в Норвежском и Баренцевом морях.

На рис. 5 приведено сравнение многолетней изменчивости потока вод через Шетландский пролив с температурой воды на Баренцевоморском разрезе и разрезе «Кольский меридиан» в слое 0–200 м. В обоих случаях получены статистически значимые коэффициенты корреляции (соответственно r = 0,446 и r = 0,435 при P = 99 %). Отсюда следует, что поток атлантических вод, проникающий в Арктический бассейн через Шетландский пролив, является мощным предиктором, определяющим динамику температуры поверхностного и глубинного горизонтов Баренцева моря.



а



б

Рис. 5. Сравнение многолетней динамики обобщенного по вертикали потока тепла через Шетландский пролив (1) с изменчивостью температуры воды на Баренцевоморском разрезе (2) (*а*) и динамики потока тепла через Шетландский пролив (1) с температурой воды на разрезе «Кольский меридиан» (2) (*б*)

На рис. 6 представлены особенности многолетней динамики осредненных по трехлетиям значений солености в ядре атлантических водных масс на океанологических разрезах Свиноу и Баренцевоморский. Заметно, что величины солености на разрезе Свиноу, находящемся в юго-западной части Норвежского моря и в большей близости к проникающим в Северо-Европейский бассейн атлантическим водным массам, на всем периоде наблюдений превосходит соответствующие величины солености на расположенном восточнее Баренцевоморском разрезе. Выделяются два основных периода экстремумов – период 1979–1980 гг., когда был зарегистрированы наиболее низкие значения солености за весь имеющийся период наблюдений и период с 2004 по 2005 г., когда на обоих разрезах синхронно произошло резкое возрастание солености воды. Кроме того, весьма значительное увеличение солености наблюдалось на Баренцевоморском разрезе в период с 1969 по 1971 г. Очевидно, значения солености воды, несмотря на значительную консервативность данной океанологической характеристики, должны во многом зависеть от интенсивности притока в западную Арктику более соленых вод атлантического происхождения.

а

б

Рис. 6. Сравнение многолетней динамики солености воды на разрезах: *а* – Свиноу (1), *б* – Баренцевоморском (1) и величин потока атлантических вод через Шетландский пролив (2)

В заключение был выполнен спектральный анализ многолетних изменений потока вод через Фареро-Шетландский пролив (рис. 8) и рассчитан тренд за период 50 лет с 1955 по 2005 г. Несмотря на то, что ряд короткий, можно с уверенностью говорить о том, что наиболее выраженные циклические колебания в потоке вод происходят с периодом около 7–8 лет. Можно предполагать также наличие циклических колебаний с периодами около 2,5 и 20 лет, а также колебание, соизмеримое с длиной ряда.

Кроме того, за 50-летний период наметился положительный тренд, свидетельствующий об увеличении потока теплых вод в Арктику через Фареро-Шетландский пролив, начиная с середины 50-х годов к началу XXI века. То есть интенсификация водообмена Северной Атлантики с Северным Ледовитым океаном является характерной чертой изменчивости динамики вод циклонического круговорота во второй половине XX столетия.

Закономерности сезонной и многолетней изменчивости циркуляции атмосферы над Северной Атлантикой

В сезонных изменениях в центре Исландской депрессии наблюдается четко выраженная годовая волна с максимумом летом и минимумом зимой. Таким образом, интенсивность циклонической циркуляции в регионе Исландского минимума возрастает зимой и ослабевает в летние месяцы.

В изменениях широты и долготы центра Исландской депрессии также преобладают в сезонном ходе волны с годовым периодом. Различия наблюдаются в моментах наступления экстремумов волн. Так, самое северное положение центр Исландского минимума давления занимает осенью, а самое южное – весной.

Изменения по долготе характерны тем, что на запад центр действия максимально смещается в конце зимы – начале весны, а к востоку – в конце лета – начале осени.

Для оценки интенсивности циркуляции важным индексом является разность давления между циклоническим центром действия и расположенным к югу от него антициклоническим образованием (в Северной Атлантике это – Азорский антициклон).

На рис. 7 приведены сезонные изменения разности давления между центрами действия в Северной Атлантике. Как видно на рисунке, меридиональный градиент давления над Северной Атлантикой максимален зимой и достигает тридцати и более гПа.

Именно поэтому для оценки интенсивности зональной и меридиональной циркуляции обычно используется индекс Северо-Атлантического колебания (North Atlantic Oscillation – NAO), который наиболее широко используется в научных исследованиях циркуляции атмосферы и климата, определяется средней разностью давления между центрами за три зимних месяца.

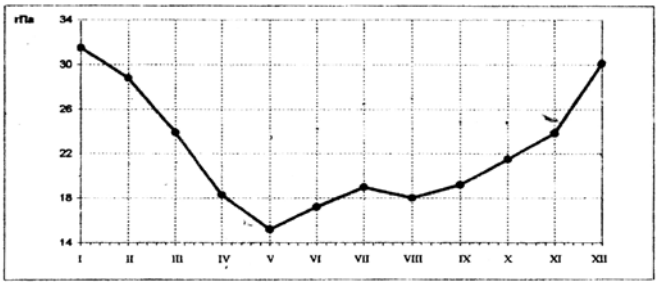


Рис. 7. Сезонные изменения разности давления между центрами действия в Северной Атлантике

На рис. 8 представлены значения давления и координат центра в среднем за три зимних месяца Исландского минимума давления, а в табл. 1 приведены средние за десятилетия значения этих характеристик.

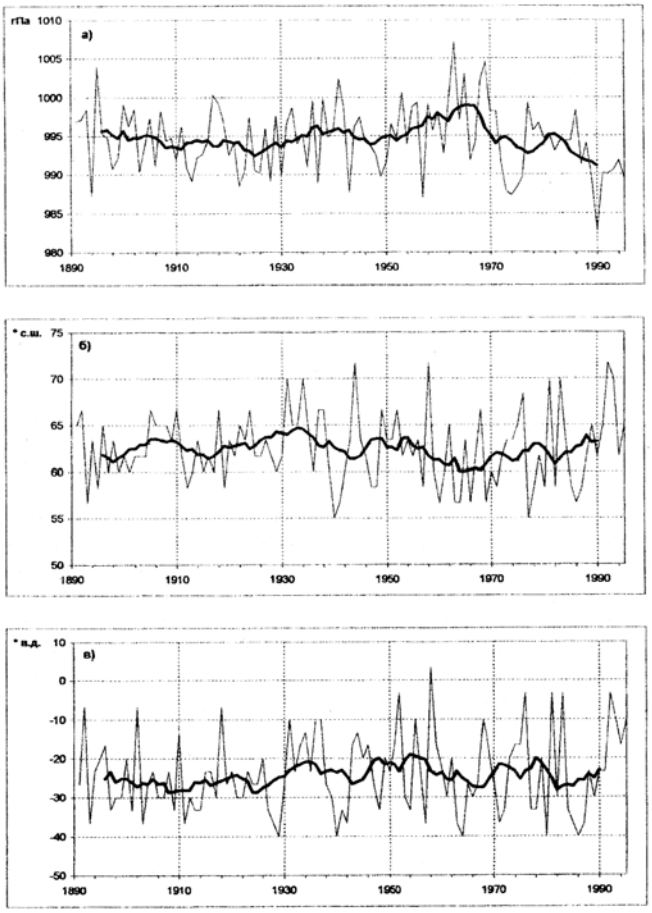


Рис. 8. Изменения давления в центре (*а*), широты (*б*), долготы (*в*) исландского минимума давления в среднем за зиму (декабрь–февраль) и их 11-летние скользящие средние (жирная линия)

Анализируя изменения давления в Исландском минимуме можно отметить следующее. С конца позапрошлого века давление в центре падало, но с конца 20-х годов оно начало расти, и особенно заметный рост наблюдался в 50-е годы. С начала 70-х годов давление вновь стало падать вплоть до середины 90-х годов, за исключением короткого промежутка в первой половине 80-х годов. Изменения средних за зиму значений всех параметров хорошо отражают и их изменения в среднем за год.

Такие изменения давления свидетельствуют об интенсификации Исландского минимума давления к 30-м годам прошлого столетия, после чего наблюдалось интенсивное его ослабление с максимумом давления в 60-е годы. В дальнейшем он снова значительно интенсифицируется в 90-е годы прошлого столетия.

По широте наблюдалось смещение к югу с конца позапрошлого столетия до начала 20-х годов прошлого столетия. Затем началось смещение к северу. В 30-е годы Исландский минимум занимал наиболее северное положение. Затем началось его смещение к югу, и в 60-е годы он занимал самое южное положение, после чего снова сместился к северу и в 90-е годы прошлого столетия занимал самое северное положение.

Смещения по долготе носят менее закономерный характер. Можно только отметить западное смещение центра в 60-е годы прошлого столетия и заметное смещение на восток в 90-е годы.

Между изменениями широты и долготы наблюдается определенная связь, и смещение центра Исландского минимума давления происходит, как правило, в направлении северо-восток – юго-запад, и наоборот.

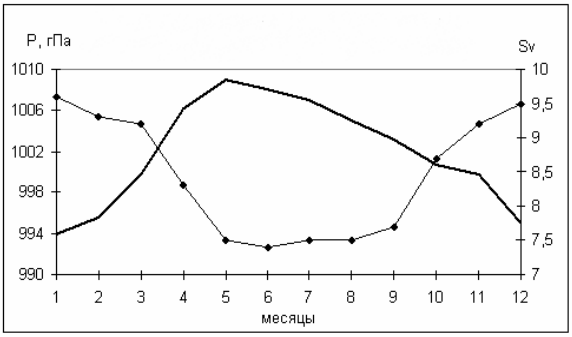
В структуре многолетней изменчивости давления в центре Исландского минимума можно выделить пики по периодам около 60 лет, 20 лет, 7, 6 и 2,4 года. Тренд практически отсутствует. Основное колебание, т.е. колебание, имеющее наибольшую амплитуду, имеет период в 7,6 лет.

Центры действия атмосферы и океана как единая система

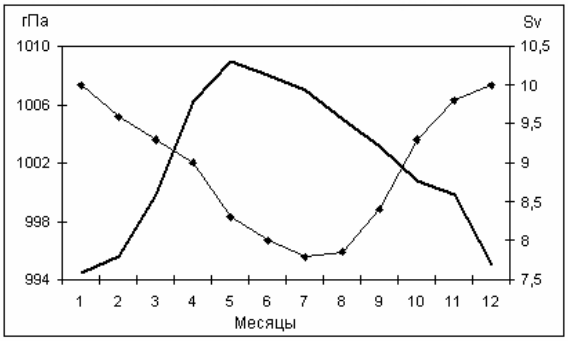
На рис. 9 приведено сопоставление изменений потока вод через Фареро-Шетландский пролив и общего потока в течение года с изменениями давления в центре Исландской депрессии. Сопоставление убедительно подтверждает синхронность изменений интенсивности Исландского минимума давления и величин потока вод в восточной ветви циклонического круговорота вод в северной Атлантике и Северном Ледовитом Океане. При этом максимум интенсивности атмосферной циркуляции и интенсивности циркуляционной системы в океане совпадают, а минимум в атмосфере наступает на два месяца раньше, то есть наблюдается некоторая инерционность в изменениях океанической циркуляции по отношению к атмосферной.

По-видимому, на изменения интенсивности циркуляции в океане, прежде всего, на изменения ее в пространстве, оказывает влияние и положение центра действия атмосферы. На рис. 10 приведено сопоставление широты центра Ис-

ландского минимума давления в течение 2001 г. с изменениями потока атлантических вод у берегов Исландии. В 2001 г. смещение Исландского минимума давления к северу было аномальным, и центр его располагался к северу от Исландии. При смещении же Исландского минимума давления к юго-западу поток атлантических вод к северу ослабевает, т.е. ослабевает весь циклонический круговорот вод в Северном Ледовитом океане.



а



б

Рис. 9. Сопоставление сезонного изменения давления в центре Исландского минимума и сезонной изменчивости потока вод через Фареро-Шетландский пролив (*а*) и с общим потоком вод из Атлантики в Северный Ледовитый океан (*б*)

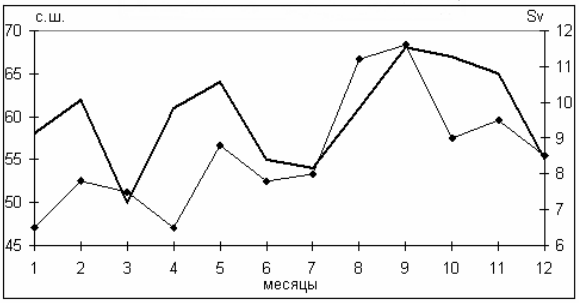


Рис. 10. Сопоставление сезонного изменения широты центра Исландского минимума и сезонной изменчивости общего потока вод в Арктический бассейн за 2001 г.

Переходя к анализу многолетних колебаний, в первую очередь рассмотрим, как связаны потоки в океане с изменением уровня.

На рис. 11 приведены значения потока вод через Фареро-Шетландский пролив с аномалиями уровня в трех точках Северной Атлантики. Из рисунка четко следует обратная связь потока вод с аномалиями уровня в точках к северу от пролива и прямая – с аномалиями уровня к югу от пролива. К сожалению, короткие ряды не позволяют привести более детальный анализ.

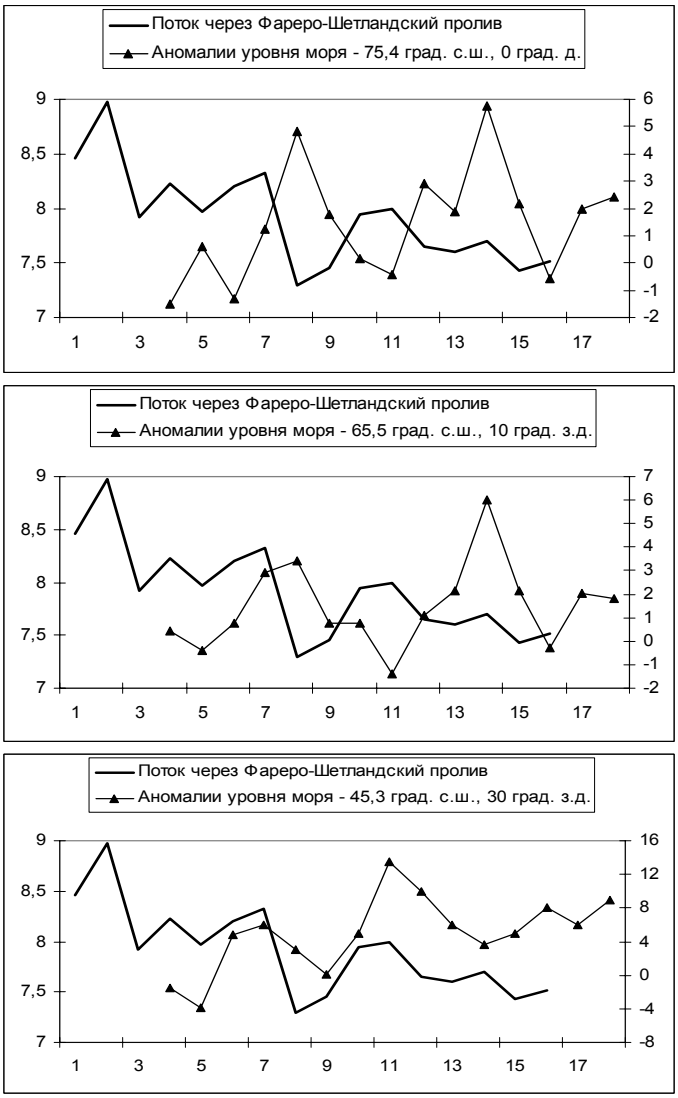


Рис. 11. Сопоставление потока вод через Фареро-Шетландский пролив с аномалиями уровня в различных точках Северной Атлантики по альтиметрическим данным

На рис. 12 приведено сопоставление не сглаженных значений потока вод через Фареро-Шетландский пролив и давления в центре Исландской депрессии.

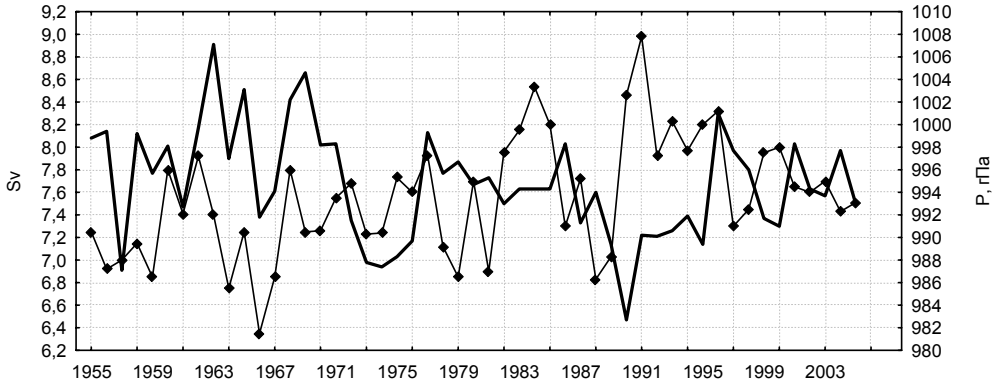


Рис. 12. Сопоставление потока вод через Фареро-Шетландский пролив (1) со значениями давления в центре Исландского минимума давления (2)

Многолетняя изменчивость потока вод на север в западной части циклонического круговорота зависят как от интенсивности Исландской депрессии, так и от ее широтного положения. Усиление потока вод в циклоническом круговороте происходит при интенсификации центра действия атмосферы и его смещение к северу. Коэффициенты корреляции во всех случаях значимы и равны –0,54, –0,72 и 0,77.

Общее усиление циркуляции атмосферы в Северной Атлантике, когда интенсифицируются как циклонический центр действия (Исландский минимум давления), так и антициклонический (Азорский максимум давления), характеризуется широко используемым в настоящее время индексом Северо-Атлантического колебания (North Atlantic oscillation – NAO). На рис. 13 представлено сопоставление несглаженных (*а*) и сглаженных (*б*) значений индекса NAO с потоком вод через Фареро-Шетландский пролив. Коэффициенты корреляции соответственно 0,65 и 0,83.

Что же происходит на противоположной ветви циклонического круговорота, лучше всего проследить по многолетним переносам вод через пролив Фрама. На рис. 14 приведены сопоставления переносов пресной воды через пролив Фрама, и характеристик Исландского минимума давления и значений индекса Северо-Атлантического колебания. Корреляции везде значимы и равны соответственно –0,55, 0,56 и 0,57. Судя по рисунку и значениям коэффициентов корреляции, связь несколько слабее по сравнению с переносами вод в восточной ветви циклонического круговорота, однако достаточно высока. Некоторое уменьшение связи отчасти связано с уменьшением точности определения переноса вод в проливе Фрама по сравнению с Фареро-Шетландским проливом, а во-вторых, некоторым влиянием Арктического антициклона на величину переноса вод в рассматриваемом циклоническом круговороте.

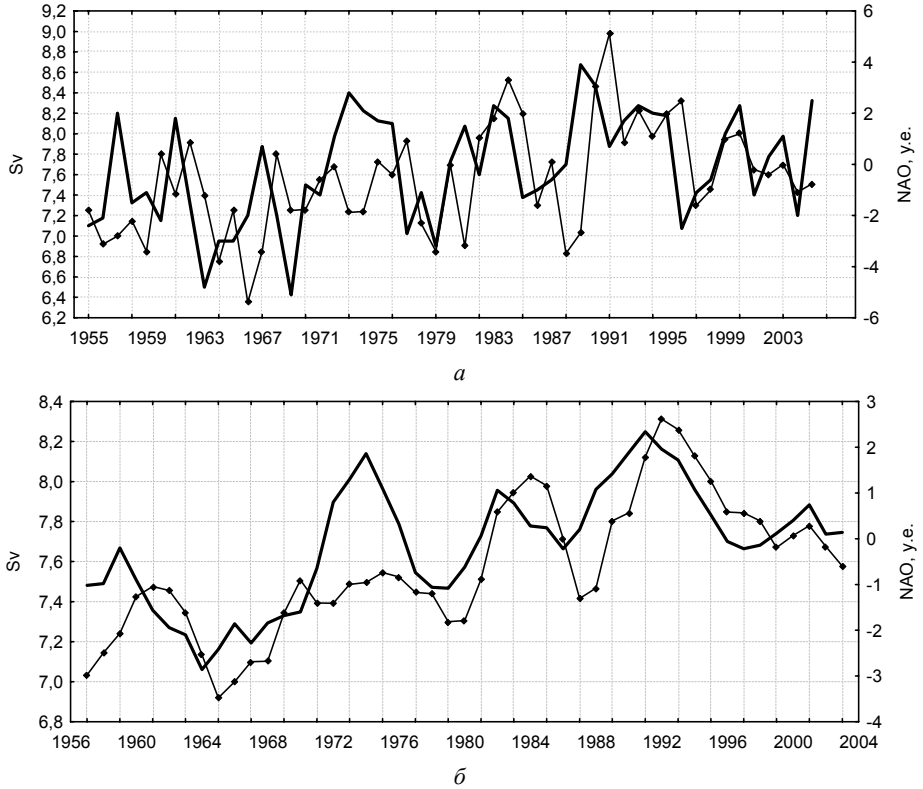


Рис. 13. Сопоставление потока вод через Фареро-Шетландский пролив и значений индекса Северо-Атлантического колебания NAO (жирная линия) за период с 1957 по 2003 г. (несглаженных (*а*) и сглаженных (*б*) по пятилетиям)

Однако в целом есть все основания считать за последние 50 лет атмосферный циклонический круговорот и циклонический круговорот вод интенсифицировались и ослабевали в одно и то же время и работали как единая система. Можно отметить некоторое небольшое запаздывание в наступлении экстремумов в интенсивности океанического круговорота относительно атмосферного, которое составляло 1–2 года. Поэтому можно предполагать, что импульс к изменениям в интенсивности и положении центров действия атмосферы и океана в Северной Атлантике идет от атмосферы.

Однородность изменчивости во времени приводит к тому, что спектры изменений как потоков в океане, так и атмосферных характеристик оказываются достаточно идентичными, с основным циклическим колебанием около 7–8 лет. Возможно, что это имеет системную природу, т.е. это собственное колебание именно этой системы. Интересно, что атмосферные индексы за 100 лет не показывают наличия тренда, а океанические за 50 лет фиксируют наличие положительного тренда. Поэтому нами были рассчитаны тренды за те же 50 лет и для атмосферных индексов.

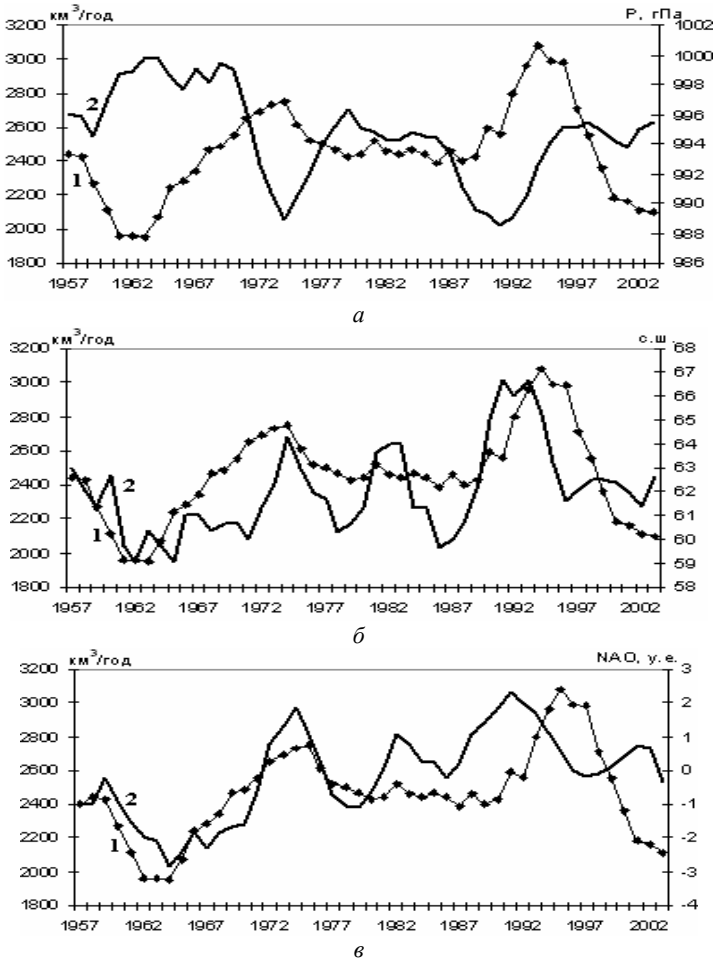


Рис. 14. Сопоставление сглаженных по 5-летиям значений переноса пресной воды через пролив Фрама (1) с изменениями давления в центре Исландской депрессии (*а*), изменениями широты центра (*б*), и изменениями индекса Северо-Атлантического колебания (*в*) (2)

На рис. 15 представлены тренды в изменениях давления Исландской депрессии и в изменениях потока вод через Фареро-Шетландский пролив и пролив Фрама. Рисунок убедительно свидетельствует о том, что в последние 50 лет (с 1955 по 2005 г.) и в изменениях интенсивности Исландского минимума давления имел место заметный тренд. Исландский минимум интенсифицировался, что приводило к интенсификации циклонической циркуляции и в атмосфере, и в океане.

Таким образом, вся временная структура динамики в атмосферном и океаническом круговоротах вод свидетельствует, что имеет место единая система, единый центр действия атмосферы и океана.

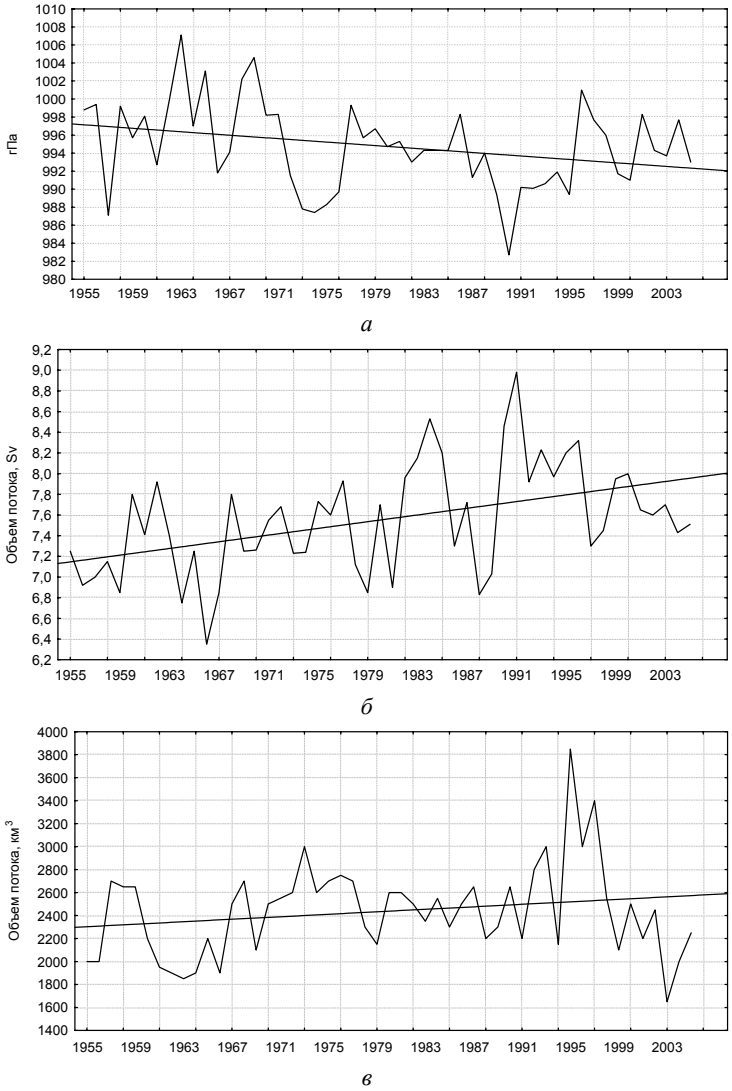


Рис. 15. Тренды изменений давления в центре Исландской депрессии (*а*) и в изменении потока вод через Фареро-Шетландский пролив (*б*) и через пролив Фрама (*в*)

Заключение

В результате выполненного исследования можно придти к следующим выводам:

– для циркуляции атмосферы и гидросферы характерно наличие вихревых масштабных структур, представляющих единые циклонические и антициклонические системы, которые можно рассматривать как центры действия атмосферы и океана;

– для одной из самых масштабных структур – циклоническому круговороту воздушных масс в атмосфере и вод в океане в Северной Атлантике – характерно синхронное изменение в интенсивности и положении в пространстве;

– структура изменчивости в обеих частях Атлантической циклонической системы одинакова. Определяющим колебанием в изменениях интенсивности циклонической циркуляции воздушных масс и вод океана является периодичность 7–8 лет, которая формируется, по-видимому, в результате взаимодействия атмосферы, гидросферы и льдов в самой системе. Можно отметить также наличие более слабых колебаний с периодами около 20 лет, 10–12 лет, 2–3 лет, а также проявившегося в последние 50 лет тренда, свидетельствующего об интенсификации воздухообмена и водообмена в Северной Атлантике и Северном Ледовитом океане во второй половине прошлого столетия;

– учитывая небольшое запаздывание в наступлении экстремумов в океанических характеристиках системы относительно атмосферных, можно полагать, что атмосфера, как более динамичная система создает первичный импульс, ведущий к изменениям во всей системе;

– установленная связь характеристик системы с данными по уровню, полученными на основе спутниковых альтиметрических наблюдений, позволяет в будущем осуществлять постоянный мониторинг за центрами действия атмосферы и океана и на этой основе попытаться разработать методику долгосрочного прогноза изменений климата в отдельных регионах Земли.

Литература

1. *Абрамов Р.В.* Многолетние и сезонные изменения географического положения Исландского минимума атмосферного давления // Изв. ВГО, 1966, т. 98, вып. 4, с. 315–325.
2. *Мартынова Т.В.* О колебаниях положения и интенсивности центров действия атмосферы. // Метеорология и гидрология, 1990, № 4, с. 50–55.
3. Международная база данных AVISO [http: // www.aviso.oceanobs.com].
4. Национальный центр океанографических данных (National Oceanographic Data Center WOCE v3) [http: // www.nodc.noaa.gov].
5. Национальное аэрокосмическое агентство США – база данных PO.DAAC [http: // www.podaac.jpl.nasa.gov].
6. *Смирнов Н.П. Воробьёв В.Н., Кочанов С.Ю.* Северо-Атлантическое колебание и климат. – СПб.: изд. РГГМУ, 2006.
7. *Смирнов Н.П. Саруханян Э.И., Розанова И.В.* Циклонические центры действия атмосферы Южного полушария и изменения климата. – СПб.: изд. РГГМУ, 2004.
8. *Смирнов Н.П., Воробьев В.Н.* Северо-Тихоокеанское колебание и динамика климата в северной части Тихого океана. – СПб.: изд. РГГМУ, 2002.
9. *Стехновский Д.И.* Барическое поле земного шара – М.: Гидрометеоиздат, 1962.
10. *Стехновский Д.И., Цветкова А.П.* Барическое поле и средние месячные изменения географического положения и интенсивности центров основных барических образований над Атлантическим и Тихим океанами (Северное полушарие) за 1931–1960 гг. // Труды Гидрометцентра СССР, 1972, вып. 107, с. 45–49.
11. *Трешников А.Ф. и др.* Центры действия атмосферы и гидросферы // Проблемы Арктики и Антарктики, 1974, вып. 43–44, с. 153–170.
12. *Dickson R.R., Meincke J., Rhines P.* Arctic-Subarctic Ocean fluxes: Defining the role of the northern seas in climate. – The Netherlands, Dordrecht.: Springer, 2008.

В.Д. Бойцов, А.Л. Карсаков, А.А. Аверкиев, Д.В. Густоев, И.П. Карпова

ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГИДРОФИЗИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ПО НАБЛЮДЕНИЯМ НА РАЗРЕЗЕ «КОЛЬСКИЙ МЕРИДИАН»

V.D. Boitsov, A.L. Karsakov, A.S. Averkiev, D.V. Gustoev, I.P. Karpova

RESEARCH OF VARIABILITY HYDROPHYSICAL CHARAKTERISTIK ON THE «THE KOLA MERIDIAN» CROSS-SECTION OBSERVATIONS

В работе представлены основные результаты исследований физико-химических и биологических процессов в Баренцевом море за последние 10 лет с использованием данных разреза «Кольский меридиан», наблюдения на котором проводятся уже 110 лет. Они были направлены на изучение пространственно-временной изменчивости характеристик состояния вод, разработку методов их прогноза, а также на оценку степени влияния параметров среды на биотические компоненты экосистем и создание методов прогноза биолого-промысловых показателей.

Ключевые слова: гидрофизические характеристики, изменчивость, водная масса, прогнозирование.

The paper provides main results of research into physical-chemical and biological processes in the Barents Sea during last 10 years using data from the Kola section where the observations have been made during the past 110 years. The investigations were aimed at study of the spatial-temporary variability in state characteristics of water, development of their forecasting methods as well as estimation of environmental influence on biotic components of ecosystems and establishment of methods for forecasting biological and fisheries indices.

Key words: hydrophysical characteristics, variability, water mass, forecasting.

В 2009 г. исполнилось 110 лет с начала проведения океанографических наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» Баренцева моря. Исследования на нем были начаты в мае 1900 г. в связи с необходимостью развития рыбного промысла на северо-западе России. Данные этого разреза представляют собой одну из самых продолжительных в мире серий океанографических наблюдений, на котором продолжают выполняться достаточно регулярные измерения характеристик состояния морских вод. Их прикладная направленность – одна из основных причин уникальности собранного материала по его длительности и дискретности. В настоящее время разрез «Кольский меридиан» выполнен более 1100 раз, а количество океанографических станций в базе данных Полярного научно-исследовательского института морского рыбного хозяйства и океанографии им. Н.М. Книповича (ПИНРО) превышает 10,5 тыс. (рис. 1).

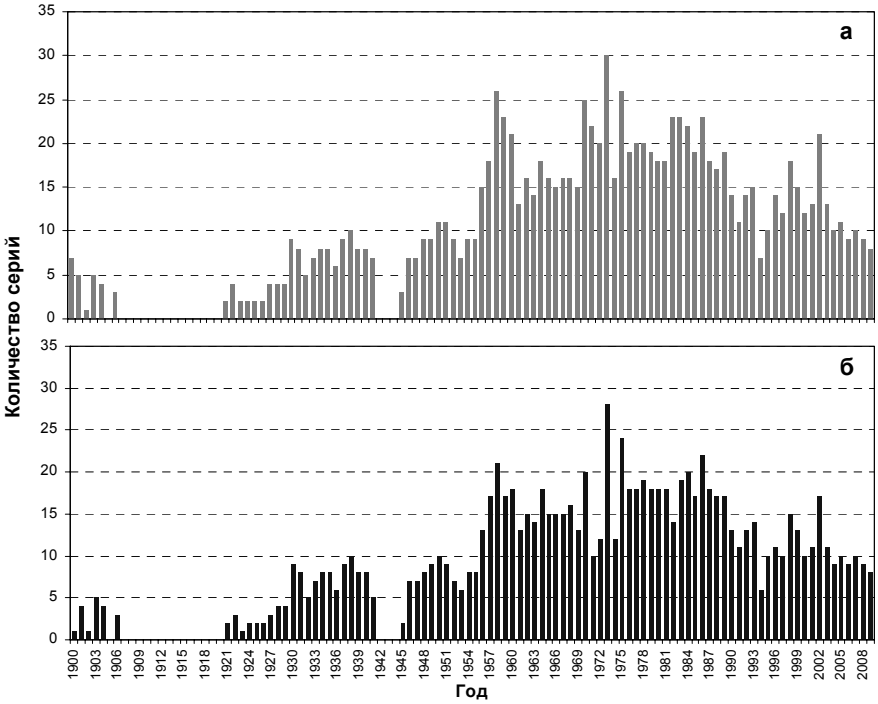


Рис. 1. Количество серий наблюдений за температурой (*а*) и соленостью (*б*) воды на разрезе «Кольский меридиан» в 1900–2009 гг.

В 1999 г. в ПИНРО состоялся международный симпозиум, посвященный 100-летию учреждения на конференции ИКЕС стандартного разреза «Кольский меридиан». В докладах, представленных на нем, подведены итоги многолетних исследований в Баренцевом море с применением данных этого разреза, а также рассмотрены особенности океанографических условий в Северной Атлантике и Северо-Европейском бассейне [100 years of oceanographic observations…, 2005]. В настоящей статье основное внимание уделено результатам изучения учеными ПИНРО и их коллегами физико-химических и биологических процессов Баренцева моря в течение 10 лет, прошедших после международного симпозиума, состоявшегося в Мурманске.

Разрез «Кольский меридиан» пересекает потоки атлантической воды, которые поступают через западную границу Баренцева моря в его южную, центральную и восточную части (рис. 2). Эти теплые воды на значительной акватории моря не дают зимой формироваться морскому льду, а наличие вертикальной циркуляции водных масс в холодный период приводит к восстановлению запасов питательных солей фотического слоя, что создает необходимые условия для развития начального звена трофической цепи – продуцентов органического вещества. Фитопланктон дает энергию последующим звеньям пищевой пирамиды, что определяет высокую биологическую продуктивность Баренцева моря.

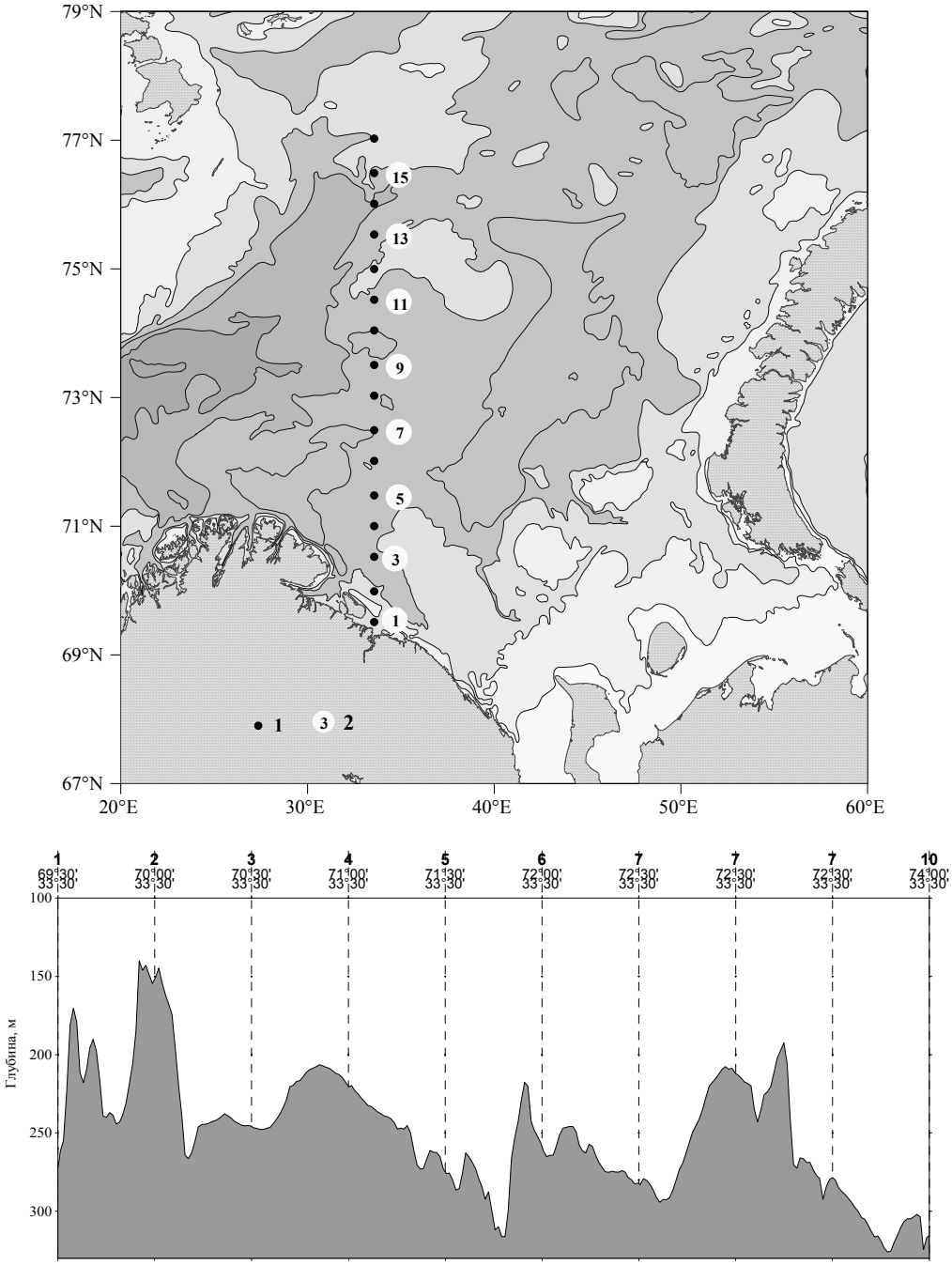


Рис. 2. Положение разреза «Кольский меридиан» в Баренцевом море (вверху) и топография дна на разрезе в пределах станции № 1–10 (внизу)

Данные наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» позволяют контролировать динамику поступления теплых вод в арктические моря и поэтому используются для решения наиболее важных задач в области физической и промысловой океанографии. К их числу относятся исследования закономерностей сезонной, межгодовой и долгопериодной изменчивости физико-химических характеристик вод, разработка методов их прогноза различной заблаговременности. Эти данные также необходимы для оценки степени влияния абиотических факторов на формирование первичной продуктивности, численности и биомассы зоопланктона и бентоса, урожайности поколений рыб и их биологических параметров, распределение и особенностей миграций гидробионтов, формирование их промысловых скоплений, создание методов прогноза биолого-промысловых показателей.

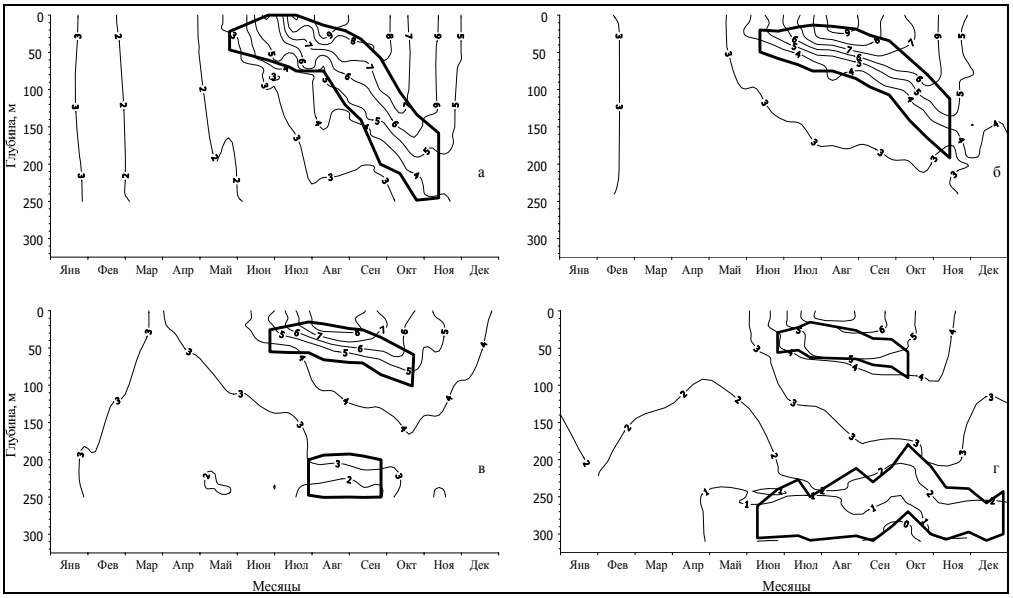


Рис. 3. Изменение термической структуры в течение года на разрезе «Кольский меридиан»: *а* – станция 1, *б* – станция 3, *в* – станция 6, *г* – станция 10 [Ившин, 2004]

Статистические характеристики сезонной изменчивости параметров состояния вод на разрезе «Кольский меридиан» являются наиболее надежными, поскольку рассчитаны по данным непрерывных наблюдений за более чем 50 лет [Карсаков, 2009]. Наличие месячных норм температуры и солености воды на каждом стандартном горизонте станций разреза позволило исследовать вертикальную термохалинную и плотностную структуру вод (рис. 3), установить время наступления их климатических экстремумов, провести сравнение параметров их сезонного хода в теплые и холодные годы (рис. 4), определить границы вод разного генезиса (рис. 5), продолжительность гидрологических сезонов [Бойцов, 2006], а также получить некоторые другие важные научные и практические результаты.

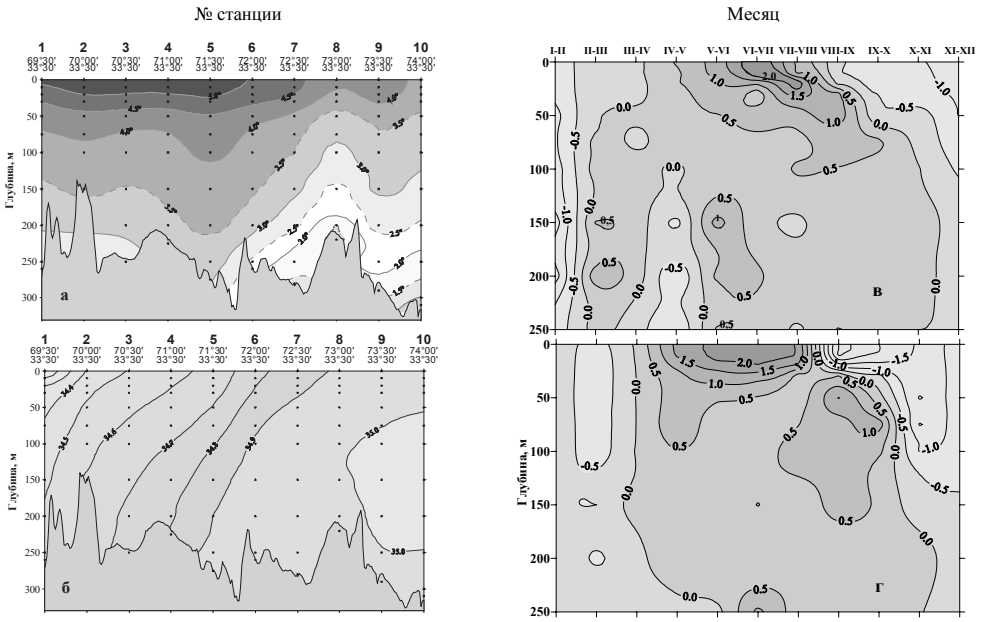


Рис. 4. Среднегодовая норма температуры (*а*) и солености (*б*) воды [Карсаков, 2009] и изоплеты межмесячной разности температуры на станции 5 разреза «Кольский меридиан" в холодном 1987 г. (*в*) и теплом 2004 г. (*г*) [Бойцов, 2006]

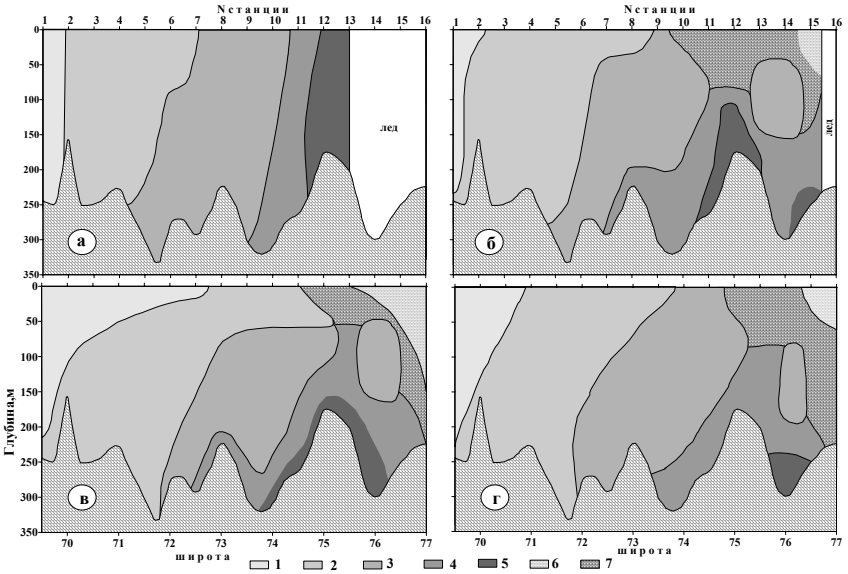


Рис. 5. Климатические границы водных масс на разрезе «Кольский меридиан» зимой (*а*), весной (*б*), летом (*в*) и осенью (*г*) [Бойцов, 2006]: 1 – прибрежная; 2 – прибрежная, смешанная с атлантической; 3 – атлантическая; 4 – атлантическая, смешанная с баренцевоморской; 5 – баренцевоморская; 6 – арктическая; 7 – атлантическая, смешанная с арктической и баренцевоморской

Поскольку разрез «Кольский меридиан» пересекает несколько водных масс, был проведен анализ сопряженности их температуры и солености между собой и с другими параметрами. Так, были выполнены расчеты коэффициентов корреляции между среднегодовыми значениями температуры, солености и ледовитости Баренцева моря. Наибольшая отрицательная статистическая связь с высоким уровнем значимости существует между этими параметрами на акватории разреза, где распределяются атлантические воды Центральной ветви Нордкапского течения, мало подверженные распреснению за счет смешения с прибрежными водами (рис. 6).

Наличие продолжительных рядов температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» позволяет исследовать спектральную структуру ее межгодовых колебаний. Чем период наблюдений больше, тем репрезентативнее оценки спектральной плотности основных энергонесущих циклов, присутствующих в скрытой форме в изменчивости показателя теплосодержания водных масс, особенно в низкочастотной части спектра. Оценка параметров нелинейного тренда в многолетних колебаниях температуры воды была выполнена по данным за весь период наблюдений, который составил 108 лет. Частотный состав колебаний среднегодовой температуры воды различных слоев с удаленным трендом рассчитан по наиболее достоверным данным за 1951–2007 гг. (рис. 7). С глубиной значительных изменений в спектральной структуре межгодовых колебаний температуры воды Мурманского течения не выявлено. Различия существуют во вкладе некоторых составляющих в ее изменчивость. В верхнем 50-метровом слое, где происходит поглощение основной части солнечной энергии и ее последующее перераспределение в нижележащие слои, наибольший вес в дисперсию температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» вносит 14–17-летний цикл. С глубиной его период несколько увеличивается, но уменьшается вклад в общую изменчивость температуры воды. Удельный вес 10–11 и 8-летней вариации напротив достигает своего максимума в ее изменениях в слое 150–200 м. В диапазоне средних частот статистически значимым является ритм 5–6 лет (рис. 7). В короткопериодной части спектра температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» доминируют два пика спектральной плотности, период которых составляет 37 и 30 месяцев. Межгодовые колебания температуры воды на разрезе "Кольский меридиан" в слое 0–50 м вносят около 31 %, в слое 50–200 м – 38 % , а в слое 150–200 м – около 50 % в ее суммарную дисперсию [Бойцов, 2009]. Представленные выше оценки частотной структуры колебаний температуры слоя 0–200 м на разрезе в целом согласуются с результатами, полученными ранее [Аверкиев, 2005] и уточняют их, в первую очередь, в низкочастотной части спектра.

С использованием более чем 100-летнего массива данных температуры воды Мурманского течения были проведены расчеты уровня сопряженности при различных временных сдвигах выделенных долгопериодных циклов в ее колебаниях с индексами космогеофизических сил и параметров циркуляции атмосферы над Северной Атлантикой и Северо-Европейским бассейном [Бойцов, 2007].

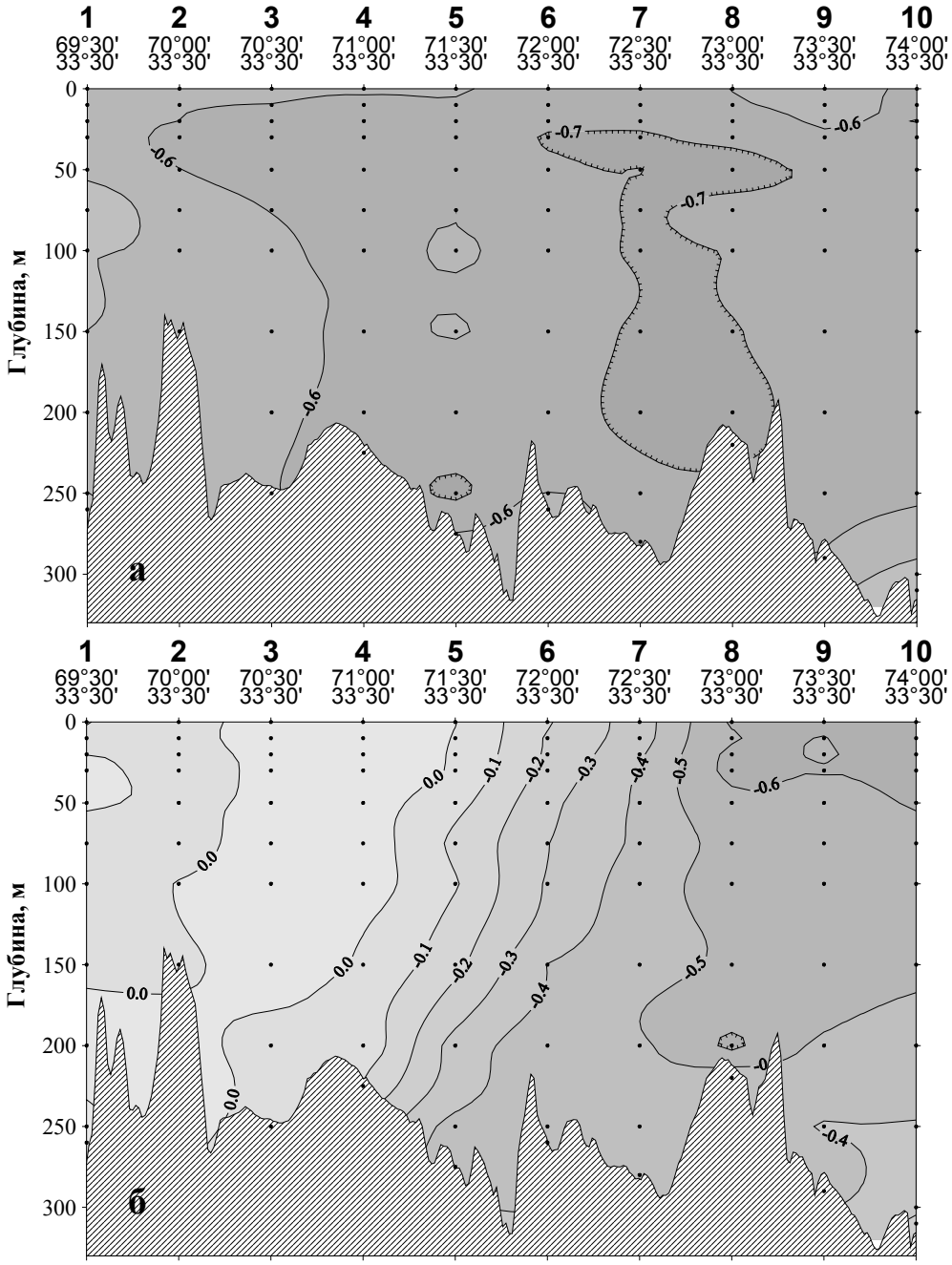


Рис. 6. Распределение коэффициентов корреляции между изменениями среднегодовой температуры (*а*), солености (*б*) воды на разрезе "Кольский меридиан" и общей ледовитости Баренцева моря в 1951–2005 гг. [Карсаков, 2009]

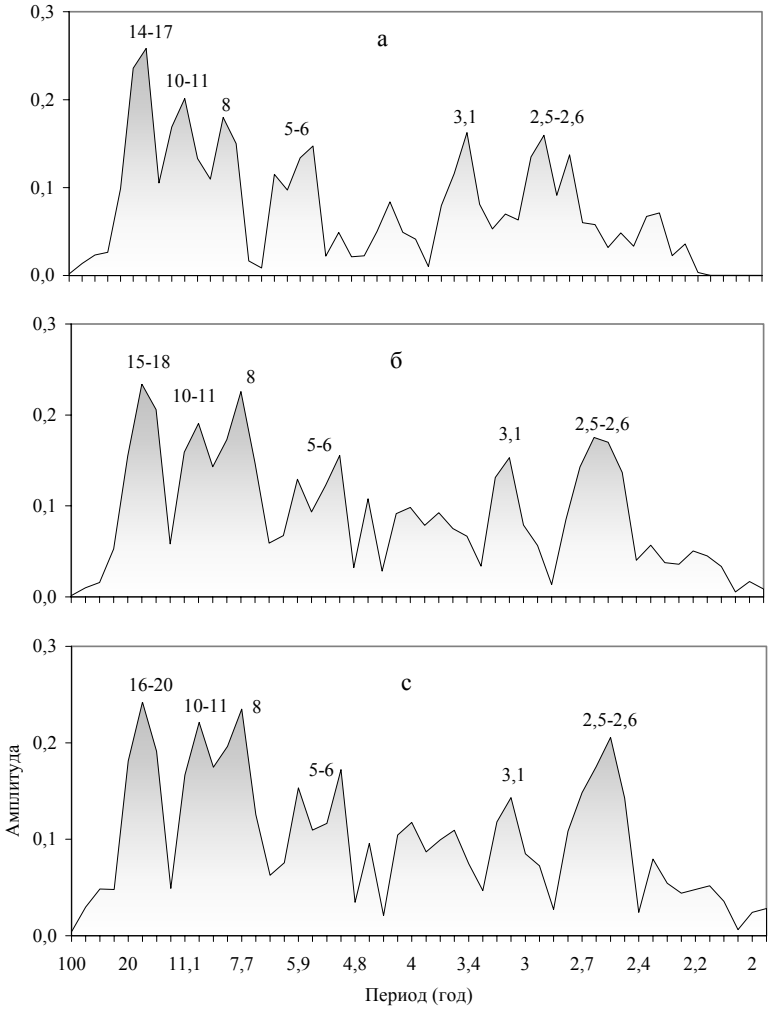


Рис. 7. Спектры колебаний среднегодовой температуры воды слоя 0–50 (*а*), 50–200 (*б*) и 150–200 м (*в*) на разрезе «Кольский меридиан» по данным за 1951–2007 гг. Над максимумами спектральной плотности указаны периоды циклических составляющих (количествово лет)

Выполнена ретроспектива временного ряда средних годовых значений температуры воды слоя 0–200 м на разрезе «Кольский меридиан» до 1840 г. [Карпова, 2001], позволившая увеличить длину исходного ряда к настоящему времени до 170 лет (рис. 8). Долгопериодная составляющая температуры воды хорошо отражает вековые изменения климата в этом регионе.

По среднемесячным данным температуры воды на 3–7 станциях разреза «Кольский меридиан» были выделены наиболее продолжительные теплые и холодные периоды в Баренцевом море в 1951–2009 гг. С 1999 г. на протяжении

132 месяцев температура воды Мурманского течения была выше нормы. Только в январе и феврале 2003 г. она приблизилась к ней (рис. 9). В 2004–2007 гг. в течение практически всех месяцев температура была аномально высокой. С ноября 2005 г. по июнь 2007 г., т.е. 20 месяцев подряд температура воды слоя 0–200 м на 1 °С превышала норму. Рекордным в этом отношении является 2006 г., когда ее среднегодовая аномалия во всех слоях составила 1,1–1,2 °С. В 2007 г. температура лишь на 0,1–0,2 °С оказалась ниже предыдущего года. В 2008–2009 гг. теплосодержание вод Баренцева моря по данным разреза «Кольский меридиан» несколько уменьшилось, но оставалось на уровне теплых и аномально теплых лет.

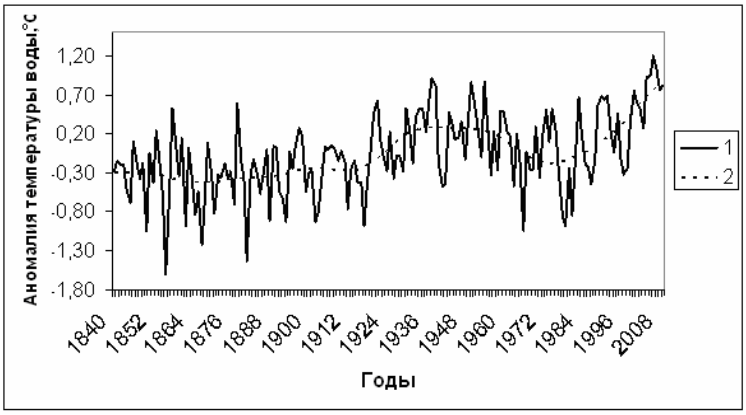


Рис. 8. Среднегодовые аномалии температуры воды слоя 0–200 м на 3–7 станциях разреза «Кольский меридиан» (1) и долгопериодная составляющая (2) за 1840–2009 гг.

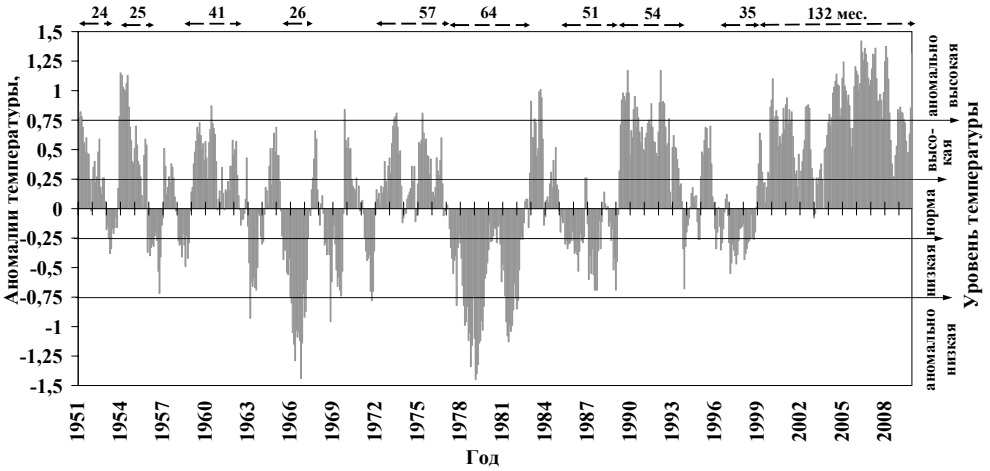


Рис. 9. Среднемесячные аномалии температуры воды слоя 0–200 м на 3–7 станциях разреза "Кольский меридиан" в 1951–2009 гг. и величина уровня теплосодержания вод по 5-балльной шкале. Стрелки сверху – границы периодов и количество месяцев с положительными и отрицательными аномалиями температуры воды

Имеющиеся с начала XX в. ряды наблюдений температуры воды на разрезе «Кольский меридиан», температуры воздуха на некоторых метеостанциях на побережье Баренцева моря и его ледовитости были использованы для расчета индекса, с помощью которого исследовались долгопериодные колебания климата [Бойцов, 2008], что необходимо для изучения причин потепления и похолодания в Северо-Европейском бассейне.

Многолетние данные ПИНРО по гидрохимии Баренцева моря, в том числе и на разрезе «Кольский меридиан» позволили исследовать сезонную и межгодовую динамику гидрохимических элементов, рассчитать уровень первичной продуктивности [Несветова, 2002], а также оценить роль условий среды в функционировании его экосистем [Титов, 2001].

В лаборатории промысловой океанографии ПИНРО совместно с сотрудниками Российского государственного гидрометеорологического университета (РГГМУ) разработан ряд методик прогноза месячных, квартальные и среднегодовых значений температуры воды Мурманского течения. Их наиболее полный обзор представлен в работах А.С.Аверкиева, Д.В. Густоева, И.П. Карповой, Е.И Серякова [2005], Ю.А. Бочкова [2005] и В.Д. Бойцова [2006].

Разработка методов прогноза океанографических показателей весьма не простая задача, поскольку развитие гидрометеорологических процессов носит сложный характер с большим набором прямых и обратных связей, которые часто имеют нелинейный вид. Поэтому параметры прогностических моделей со временем могут быть неадекватны описываемым явлениям, что побуждает исследователей вносить в них коррективы или разрабатывать новые. Так, отдельные, хорошо зарекомендовавшие себя прогностические модели, в которых использовался большой набор независимых переменных, имели низкую оправдываемость в осенне-зимний период, когда часто происходит смена ранее наблюдавшегося типа развития гидрометеорологических процессов на новый, определяющий характер их развития в течение последующих сезонов [Крылова, Серяков, 1975; Методические рекомендации по статистико-вероятностному…, 1989]. Данные наблюдений показали, что смена знака аномалий температуры воды слоя 0–200 м на разрезе «Кольский меридиан» чаще всего происходила в ноябре–феврале. Поэтому, чтобы учесть особенности сезонной динамики циркуляции атмосферы и температуры воды Баренцева моря, была разработана комбинированная методика прогноза теплосодержания водных масс на разрезе «Кольский меридиан» для января–марта. В ней используется комплексирование результатов расчета с помощью автопрогноза, динамико-статистический метод и метод подбора аналога [Карсаков, Гузенко, Никифоров, 2001].

В разработанной методике прогноза среднемесячной температуры воды слоя 0–200 м на разрезе "Кольский меридиан" с заблаговременностью 1–2 месяца с помощью косвенной оценки основных составляющих теплового баланса водных масс осуществляется поиск года-аналога, в котором абсолютные значения предикторов и их динамика в предшествующий период имели наименьшие

различия в год прогнозирования. На основе результатов спектрального анализа межгодовых колебаний температуры воды Мурманского течения предложен аддитивный метод прогноза среднегодовой температуры воды слоя 0–200 м с заблаговременностью 1 и 2 года. Его проверка показала значительное превышение оправдываемости методических прогнозов по сравнению с климатологическими прогнозами [Бойцов, 2006].

Последнее десятилетие в РГГМУ продолжены работы по совершенствованию и внедрению методики сверхдолгосрочного прогнозирования, основанной на статистико-вероятностной аппроксимации особенностей внутренней, квазипериодической структуры временных серий с периодом осреднения от месяца до года [Аверкиева, Густоева, Карповой, Серякова, 2005]. Кроме того, проводятся исследования по возможности применения метода главных компонент для прогноза температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» [Малинин, Гордеева, 2003].

На протяжении 24 лет составляются оперативные прогнозы средней годовой температуры воды в слое 0–200 м на станциях 3–7 разреза «Кольский меридиан» с заблаговременностью один и два года с использованием пакета программ «Призма» [Аверкиев, Булаева, Густоев, Карпова, 1997]. Проведенная оценка оправдываемости этих прогнозов за 1986–2009 гг. показала следующие результаты: оправдываемость по знаку аномалии одношаговых прогнозов составила 83 %, двухшаговых – 71 %; оправдываемость по величине относительно среднего квадратического отклонения для одношаговых прогнозов составила 79 %, для двухшаговых – 64 %. Таким образом, оправдываемость этой методики превысила оправдываемость климатических прогнозов в первом случае на 29 %, во втором – на 17 %.

Начиная с 2005 г., прогнозы составляются на каждый месяц с заблаговременностью один, два года и на период теоретической максимальной заблаговременности – четыре года. Оправдываемость опытных прогнозов за 2009 г. представлена в таблице. Как видно из таблицы, оправдываемость прогнозов, составленных в 2008 г., достигает 100 % по знаку аномалии и численному значению; составленных в 2007 г. (с двухгодовой заблаговременностью) – 100 % по знаку и 92 % по численному значению.

За весь период опытного использования методики (четыре года) оправдываемость сверхдолгосрочных прогнозов среднемесячной температуры воды слоя 0–200 м Мурманского течения на разрезе «Кольский меридиан» на 2006–2009 гг. составила 98 % по знаку аномалии и 95 % по численному значению.

Опытное прогнозирование среднемесячных значений температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» с заблаговременностью 3 и 4 года начато в 2008 г., однако такие прогнозы эпизодически составлялись в 2004 и 2005 гг. Несмотря на малую статистическую обеспеченность их оправдываемость достаточно велика и составила 91 % по знаку аномалии и 67 % по численному значению.

Оправдываемость опытных прогнозов среднемесячной температуры воды слоя 0–200 м основной ветви Мурманского течения на разрезе «Кольский меридиан» на 2009 г.

Прогноз, составленный в 2007 г.				Прогноз, составленный в 2008 г.			2009 г.
Месяц	Значение, °С	Сигма, °С	Оправдываемость: величина/знак	Значение, °С	Сигма, °С	Оправдываемость: величина/знак	Факт., °С
Январь	4,63	0,52	+/+	4,87	0,52	+/+	4,61
Февраль	4,31	0,58	+/+	4,45	0,58	+/+	4,21
Март	4,02	0,56	+/+	4,14	0,56	+/+	3,88
Апрель	3,80	0,56	++	3,84	0,56	+/+	3,70
Май	3,75	0,60	+/+	3,86	0,60	+/+	3,81
Июнь	4,12	0,60	+/+	4,09	0,60	+/+	4,25
Июль	4,95	0,58	+/+	4,90	0,58	+/+	4,70
Август	5,50	0,59	+/+	5,56	0,59	+/+	5,10
Сентябрь	5,55	0,55	+/+	5,55	0,55	+/+	5,37
Октябрь	5,32	0,57	+/+	5,53	0,57	+/+	5,51
Ноябрь	5,44	0,53	+/+	5,51	0,53	+/+	5,53
Декабрь	4,98	0,47	–/+	5,10	0,47	+/+	5,56

В настоящее время в ПИНРО и в РГГМУ продолжаются исследования по разработке новых и усовершенствованию уже имеющихся методов прогноза океанографических характеристик состояния вод с использованием данных разреза «Кольский меридиан». Расчеты параметров будущего состояния морской среды с месячной заблаговременностью используются при прогнозировании распределения объектов промысла, сроков их миграций, а годовые и перспективные прогнозы необходимы для оценки изменений численности пополнений промысловых популяций и экосистем (рис. 10). Насколько нам известно, подобного рода многолетние исследования по поиску формализованных методов прогноза абиотических условий с последующим использованием их результатов для заблаговременной оценки биолого-промысловых показателей в других институтах отрасли и в других странах не проводятся, что определяет уникальность разработок ПИНРО и РГГМУ.

Освоение биологических ресурсов Баренцева моря в течение уже 70 лет сопровождается изучением влияния условий среды на биотические компоненты экосистем. При этом данные разреза «Кольский меридиан» в этих исследованиях использовались наиболее часто [Бойцов, Несветова, Ожигин, Титов, 2005].

В последние годы были разработаны модели прогноза численности пополнения основных промысловых видов рыб Баренцева моря. Как известно, температура оказывает прямое, а через некоторые гидрометеорологические процессы и опосредованное воздействие на выживание икры и личинок рыб, т.е. на формирование урожайности их годовых классов. Кроме того, изменчивость температуры влияет на сроки развития и пространственное распределение кормового зоопланктона. Поэтому при изучении влияния факторов среды на динамику ве-

личины пополнения рыб чаще всего использовались данные температуры воды на разрезе «Кольский меридиан». Так, в предложенных методиках его средняя температура различных слоев применяется при расчетах ряда индексов, характеризующих физические «возмущения» в среде и скорости протекания некоторых процессов. Они вместе с гидрохимическими параметрами вошли в качестве предикторов в многомерные прогностические модели динамики пополнения атлантической сельди, мойвы и трески Баренцева моря [Титов, 2003]. Температура воды разреза «Кольский меридиан» является основным предиктором в вероятностном методе прогноза индекса численности годовых классов северо-восточной арктической трески на стадии пелагической молоди [Бойцов, 2005] и в методике прогноза численности ее поколений, вступающих в промысел [Бойцов, 2009].

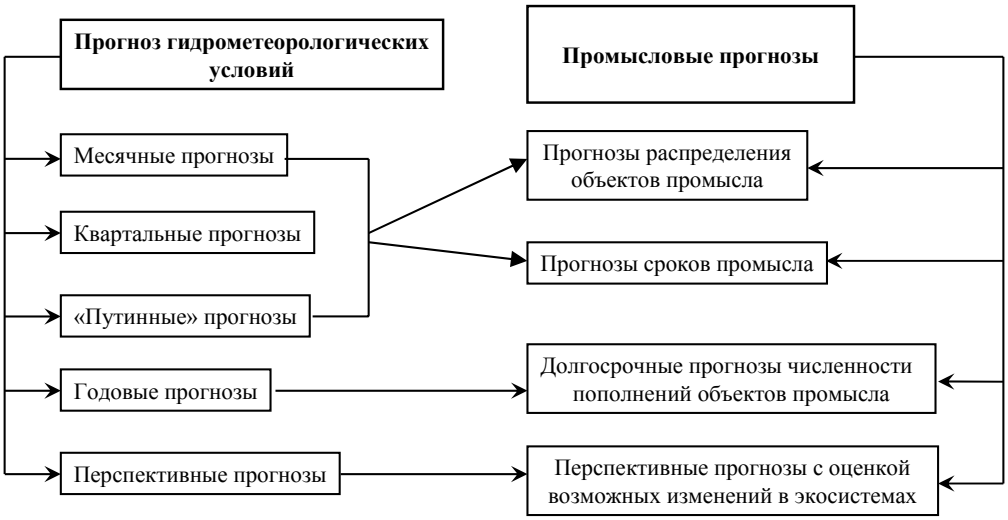


Рис. 10. Использование данных разреза «Кольский меридиан» в прогностической деятельности ПИНРО

Температура воды разреза «Кольский меридиан» часто используется в качестве показателя теплового состояния водных масс всей южной части Баренцева моря, так как существует высокая сопряженность ее колебаний с температурой воды на других разрезах. Исследования показали, что теплосодержание вод Мурманского течения весной во многом определяет положение северно-восточной границы распределения баренцевоморской трески летом, что позволило включить этот показатель в модель при разработке метода прогноза границ этой части нагульного ареала рыбы [Гузенко, 2007].

На пространственное распределение ранних стадий и промысловых скоплений рыб на акватории Баренцева моря могут оказывать влияние особенности циркуляции водных масс. Это подтвердили результаты сопоставления расходов воды через стандартные разрезы моря, в том числе и разрез «Кольский меридиан», с площадью разноса сеголеток норвежской весенне-нерестующей сельди [Трофи-

мов, Прохорова, 2005]. Установлено, что при увеличении интенсивности переноса атлантических вод Мурманским течением часто происходит смещение ареала и границы наибольших скоплений пинагора к востоку [Трофимов, Русяев, 2005].

В настоящее время данные разреза «Кольский меридиан» доступны в Интернете на сайте ПИНРО (www.pinro.ru). Используя их, наши коллеги из норвежского института морских исследований в Бергене (БИМИ) пришли к заключению, что температура воды на разрезе является репрезентативной для оценки изменений климата на акватории распределения атлантических вод. Она является хорошим индикатором влияния условий среды на выживание и рост молоди трески, пикши и сельди [Оттерсен, Одланнсвик, Луенг, 2005].

В последние годы измерения параметров среды на большинстве других стандартных разрезах Баренцева моря проводятся достаточно редко. Поэтому для решения многих важных научных и прикладных задач физической и промысловой океанографии могут быть использованы только данные векового океанографического разреза «Кольский меридиан». Поэтому представленные в работе результаты исследований особенностей океанографических условий моря, колебаний климата, оценки влияния абиотических условий на распределение и динамику численности промысловых видов показывают важность этих данных в комплексных экосистемных исследованиях и необходимость продолжения наблюдений на разрезе «Кольский меридиан» в объеме, необходимом для получения достоверных данных о состоянии вод Баренцева моря.

Литература

1. *Аверкиев А.С., Булаева В.М., Густоев Д.В., Карпова И.П.* Методические рекомендации по использованию метода сверхдолгосрочного прогнозирования гидрометеорологических элементов (МСПГЭ) и программного комплекса «Призма». – Мурманск: Изд. ПИНРО, 1997. – 40 с.
2. *Аверкиев А.С., Густоев Д.В., Карпова И.П., Серяков Е.И.* Исследование и долгосрочное прогнозирование тепловых процессов на разрезе «Кольский меридиан» // 100 лет океанографических наблюдений на разрезе "Кольский меридиан" в Баренцевом море. – Мурманск: Изд. ПИНРО, 2005, с. 15–31.
3. *Бойцов В.Д.* Вероятностный метод прогноза урожайности поколений северо-восточной арктической трески Баренцева моря // Рыбное хозяйство, 2005. № 2, с. 42–44.
4. *Бойцов В.Д.* Изменчивость температуры воды Баренцева моря и ее прогнозирование. – Мурманск: Изд. ПИНРО, 2006. – 292 с.
5. *Бойцов В.Д.* Космогеофизические факторы и межгодовые колебания температуры воды Баренцева моря // Рыбное хозяйство, 2007, № 1, с. 57–60.
6. *Бойцов В.Д.* Долгопериодные колебания температуры воздуха в Северной Атлантике и Северо-Европейском бассейне // Изв. РГО, 2008, т. 140, вып. 2, с. 6–11.
7. *Бойцов В.Д.* Изменчивость температуры воды Баренцева моря и ее воздействие на биотические компоненты экосистемы: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. – СПб., 2009. – 49 с.
8. *Бойцов В.Д., Несветова Г.И., Ожигин В.К., Титов О.В.* Разрез «Кольский меридиан» и промыслово-океанографические исследования Баренцева моря // 100 лет океанографических наблюдений на разрезе "Кольский меридиан" в Баренцевом море. – Мурманск: Изд. ПИНРО, 2005, с. 32–46.

9. *Бочков Ю.А.* Крупномасштабные колебания температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» и их прогнозирование // 100 лет океанографических наблюдений на разрезе "Кольский меридиан" в Баренцевом море. – Мурманск: Изд. ПИНРО, 2005, с. 47–64.
10. *Гузенко В.В.* Термохалинный режим восточной части Баренцева моря и его влияние на распределение промысловых рыб: Автореф. дис.... канд. геогр. наук. – СПб., 2007. – 23 с.
11. *Ившин В.А.* Вертикальная термохалинная и плотностная структура вод Баренцева моря. – Мурманск: Изд. ПИНРО, 2004. – 99 с.
12. *Карпова И.П.* О ретроспективе температуры воды на разрезе «Кольский меридиан» // Тимонов Всеволод Всеволодович. К 100-летию со дня рождения/Научные статьи и воспоминания. – СПб, изд. РГГМУ, 2001, с. 55–59.
13. *Карсаков А.Л.* Океанографические исследования на разрезе «Кольский меридиан» в Баренцевом море за период 1900–2008 гг. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2009. – 139 с.
14. *Карсаков А.Л., Гузенко В.В., Никифоров А.Г.* Комплексный метод прогнозирования температуры воды на разрезе "Кольский меридиан" // Материалы конференции молодых ученых, посвященной 80-летию ПИНРО. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2001, с. 3–13.
15. *Крылова В.В., Серяков Е.И.* Оценка оправдываемости различных методов оперативных прогнозов температуры воды // Сб. науч. тр. ЛГМИ, 1975, вып. 56, с. 134–142.
16. *Малинин В.Н., Гордеева С.М.* Физико-статистический метод прогноза океанографических характеристик (на примере Северо-Европейского бассейна). – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2003. – 164 с.
17. Методические рекомендации по статистико-вероятностному прогнозированию океанологических характеристик. – Мурманск, 1989. – 93 с.
18. *Несветова Г.И.* Гидрохимические условия функционирования экосистемы Баренцева моря. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2002. – 294 с.
19. *Титов О.В.* Системный подход к анализу естественных многолетних изменений экосистемы Баренцева моря. – Мурманск: Изд-во ПИНРО, 2001. – 119 с.
20. *Титов О.В.* Многолетние изменения гидрохимического режима и экосистемы Баренцева моря: Автореф. дис. ... д-ра геогр. наук. – СПб., 2003. – 48 с.
21. *Трофимов А.Г., Прохорова Т.А.* Влияние динамики вод на распределение 0-группы сельди в Баренцевом море // Мат-лы XIII Междунар. конф. по промысловой океанологии. – Калининград: Изд-во АтлантНИРО, 2005, с. 267–271.
22. *Трофимов А.Г., Русяев С.М.* Роль гидродинамических условий в распределении нагульных скоплений пинагора Баренцева моря // Мат-лы XIII Междунар. конф. по промысловой океанологии. – Калининград: Изд-во АтлантНИРО, 2005, с. 271–275.
23. *Ottersen G., Edlandsvik B., Loeng H.* The Kola section – an indicator of Barents Sea climate // 100 years of oceanographic observations along the Kola Section in the Barents Sea. – Papers of the international symposium. – Murmansk: PINRO, 2005, p. 236–251.
24. 100 years of oceanographic observations along the Kola Section in the Barents Sea. – Papers of the international symposium. – Murmansk: PINRO, 2005. – 314 pp.

В.Н. Малинин, О.И. Шевчук

ОБ ИЗМЕНЕНИЯХ ГЛОБАЛЬНОГО КЛИМАТА В НАЧАЛЕ 21-ГО СТОЛЕТИЯ

V.N. Malinin, O.I. Shevchuk

ON CHANGING OF THE GLOBAL CLIMATE IN THE EARLY 21ST CENTURY

Обсуждается межгодовая изменчивость глобальных значений приповерхностной температуры воздуха, температуры поверхности океанов, морского уровня и теплосодержания Мирового океана на рубеже XX–XXI вв. Показано, что после 2005 г. наблюдается уменьшение этих характеристик, что свидетельствует о похолодании климата.

Ключевые слова: климат, приповерхностная температура воздуха, температура поверхности океанов, уровень Мирового океана, теплосодержание океана.

Interannual variability of global estimates of subsurface air temperature, of sea surface temperature, sea level and heat content of the World Ocean at the turn of 20 and 21 centuries is discussed. It is shown that the decrease of these characteristics is being observed after 2005 which gives evidence of the climate cooling.

Keywords: climate, subsurface air temperature, sea surface temperature, sea level, ocean heat content.

Важнейшим параметром глобального климата является, как известно, приповерхностная температура воздуха (ПТВ). Относительно достоверные оценки ее изменений могут быть получены по результатам инструментальных наблюдений, которые ведутся лишь с середины XIX века. Межгодовой ход глобальной ПТВ, систематизированный в Четвертом оценочном отчете МГЭИК [IPCC, 2007] и основанный на глобальных архивах гидрометеорологической информации [Brohan, et al., 2006, Hansen, et al., 2001, Lugina, et al., 2005, Smith, et al., 2005], свидетельствует о постепенном росте ПТВ в XX веке (величина тренда Tr=0,6–0,7°C). Однако изменения ПТВ на земном шаре происходили неодинаково. Наряду с промежутками времени, когда отмечалось интенсивное повышение температуры, были такие, когда она понижалась. Так, с начала XX в. до 1940 г. отмечался рост ПТВ (Tr=0,08°C/10лет), который особенно ярко проявлялся в высоких широтах северного полушария. Поэтому 20–40-е годы получили название «потепление Арктики». Затем вплоть до середины 70-х годов отмечалось похолодание климата, характеризуемое значимым отрицательным трендом Tr = –0.04°C/10лет. И только после этого произошел резкий рост ПТВ (Tr=0.18°C/10лет). Последнее десятилетие XX в. стало самым теплым за столетие.

В начале XXI в. рост ПТВ продолжался (рис.1). В 2005 г. отмечалась самая высокая аномалия глобальной температуры воздуха (ΔПТВ=$\Delta T_{гл}$=0.48°C относительно периода 1960–1990 гг.). Затем началось довольно быстрое ее сниже-

ние и уже в 2008 г. она уменьшилась до $\Delta T_{гл}$ =0.32°*C*. Отметим полностью согласованный с ПТВ ход температуры поверхности Мирового океана. Таким образом, главный вопрос состоит в том, является ли уменьшение ПТВ временным или потепление климата закончилось и начался новый период его похолодания.

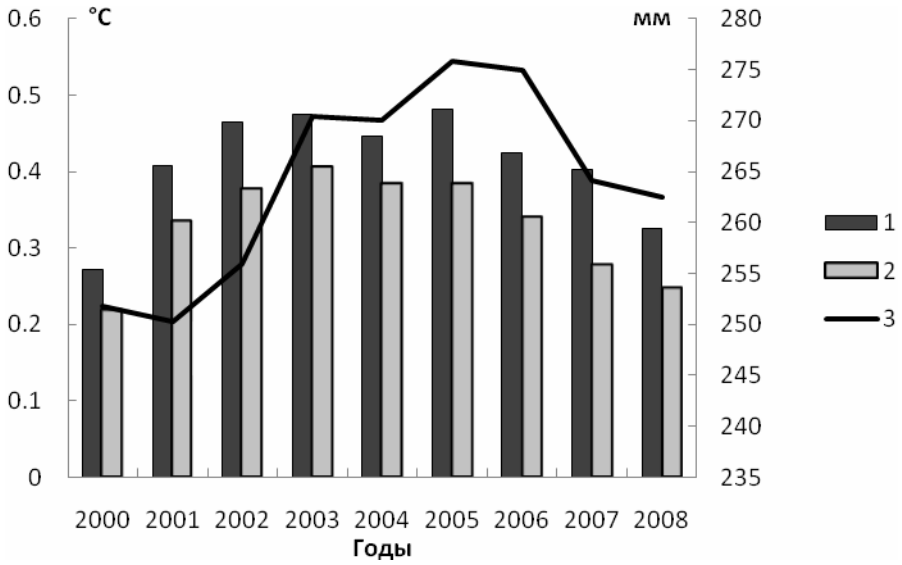


Рис. 1. Временной ход в XXI в. аномалий глобальных значений приповерхностной температуры воздуха (1) [HADCRUT3] и температуры поверхности океана (2) [HADSST2] и уровня Мирового океана (3)

Другой важнейшей характеристикой глобального климата являются колебания уровня Мирового океана (УМО). При этом именно изменения приповерхностной температуры воздуха формируют режим накопления (расходования) массы горных ледников, морских льдов, в значительной степени покровных ледников и, следовательно, определяют поступление пресных вод ледников в океан. Кроме того, ПТВ влияет на изменчивость испарения и осадков над океаном [Малинин, 2009, Малинин, Шевчук, 2008], а через изменения температуры поверхности океана вызывают стерические колебания уровня. Таким образом, ПТВ можно рассматривать как главный определяющий фактор колебаний УМО.

В связи с этим рассмотрим особенности статистической связи ПТВ и УМО. Временной ряд среднегодовых значений $\Delta T_{гл}$ заимствован из архива за 1900–2008 гг., а временные ряды УМО, определенные по данным береговых станций архива PSMSL, заимствованы из работ [Малинин и др., 2007, Church, White, 2006, Jevrejeva, et. al., 2006]. За указанный период лет для всех 3 рядов УМО была рассчитана скользящая по 30-летиям корреляция с $\Delta T_{гл}$, результаты которой приводятся на рис. 2. Нетрудно видеть, что для рассматриваемых рядов УМО связь практически идентична, при этом макси-

мальная корреляция ($r > 0.80$) отмечается для периодов максимального роста ПТВ, в то время как для периода похолодания глобального климата статистическая связь между $\Delta T_{гл}$ и УМО практически незначима. Это связано тем, что в отличие от $\Delta T_{гл}$ почти непрерывный рост УМО продолжался в течение всего столетия. Причина этого состоит в том, что ПТВ влияет на колебания УМО не только при синхронном взаимодействии океана и атмосферы, но и при запаздывании УМО относительно ПТВ в 20 и 30 лет. Именно для этих сдвигов получены адекватные по критерию Фишера статистические модели УМО от аномалий ПТВ в северном и южном полушариях [Малинин, 2006].

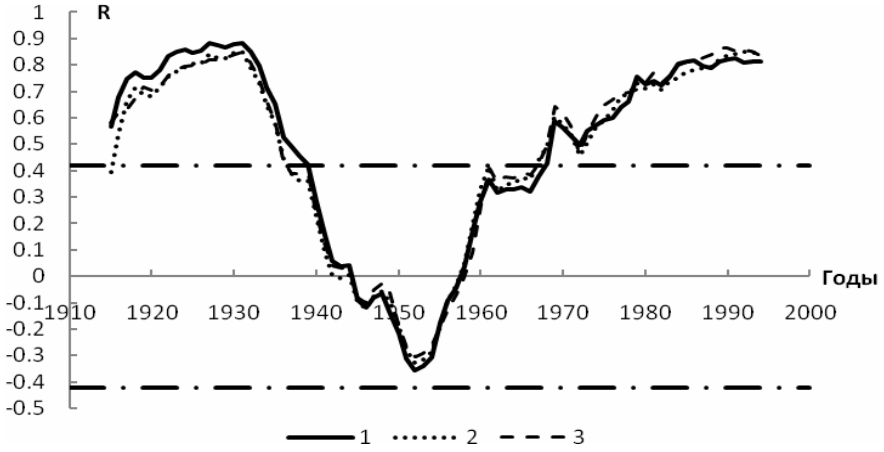


Рис. 2. Временной ход скользящей по 30-летиям корреляции аномалий глобальной ($\Delta T_{гл}$) и уровня Мирового океана (УМО) по данным [Малинин и др., 2007] (1), [Church, White, 2006] (2), [Jevrejeva, et. al., 2006] (3) за период 1900–2008 гг. Горизонтальные линии – доверительный 99 % интервал

Подобное запаздывание колебаний УМО может быть вызвано «медленными» изменениями эвстатической и стерической компонент. Медленные изменения эвстатической компоненты – это изменения массы ледниковых щитов Антарктиды и Гренландии, поскольку временной цикл от момента выпадения осадков на ледниковые щиты до откалывания айсбергов может составлять от нескольких десятилетий до нескольких столетий. Медленные изменения стерической компоненты обусловлены изменением температуры воды в толще вод океана до нижней границы главного термоклина. Данный процесс из-за малых вертикальных скоростей происходит от нескольких лет до нескольких десятилетий. Поэтому даже при похолодании климата становится возможным повышение УМО. Именно это и происходило в середине XX в.

Рассчитанный нами временной ход УМО в XXI в. хорошо согласуется с ПТВ (рис.1). Максимальное значение УМО отмечается в 2005 г., после чего он начал уменьшаться. Причиной этого являются, очевидно, «быстрые» изменения эвстатической и стерической компонент. К эвстатической компоненте в данном

случае относятся, прежде всего, испарение и осадки, а к стерической – внешний тепловой баланс океана, представляющим собой результирующий вертикальный поток тепла, который определяет колебания теплосодержания деятельного слоя океана. Естественно, при понижении ПТВ теплосодержание деятельного слоя океана также уменьшается. Кроме того, возможное влияние на колебания УМО может оказать и теплосодержание глубинных слоев океана.

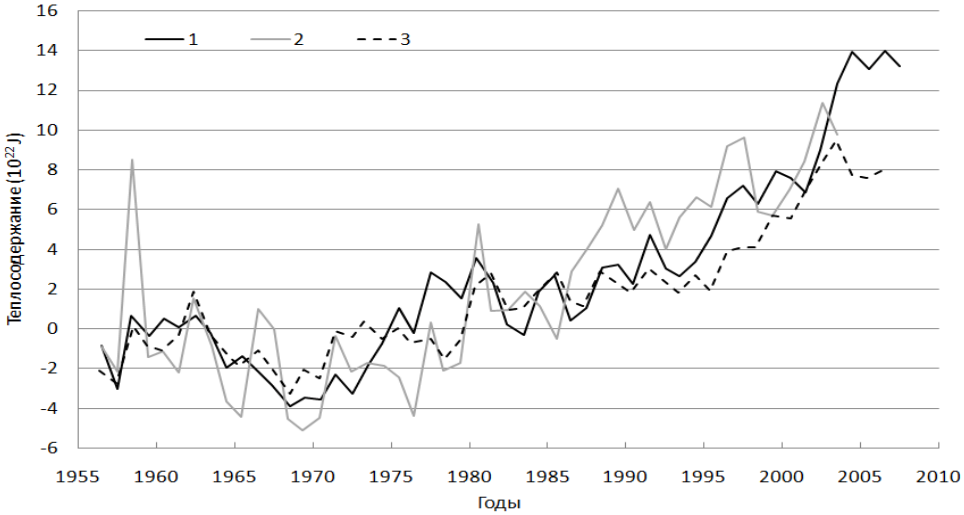


Рис. 3. Межгодовой ход глобального теплосодержания океана в слое 0–700 м, рассчитанный в работах [16] (1), [14] (2) и [15] (3)

В работах [Domingues, et. al., 2008, Ishii, Kimoto, 2009, Levitus, et. al., 2009] рассмотрен межгодовой ход глобального теплосодержания океана в слое 0–700 м с 1955 г. (рис. 3). Нетрудно видеть, что до последнего времени все три кривые имеют согласованный характер, однако начиная с 2003–2004 гг. эта согласованность резко нарушается. Так, данные [Domingues, et. al., 2008] показывают, что максимум теплосодержания приходится на 2003 г., а данные [Ishii, Kimoto, 2009] – на 2004 г., после чего оно довольно резко уменьшается. И только результаты [Levitus, et. al., 2009] свидетельствуют о росте теплосодержания вплоть до 2005 г., после которого его рост прекратился. Итак, из результатов последних экспериментальных работ следует, что с середины первого десятилетия XXI века теплосодержание стало уменьшаться или, по крайней мере, перестало расти, что в целом согласуется с результатами наших расчетов. Возможно, в ближайшие годы станет ясно, носит ли охлаждение океана временный характер или это долговременная тенденция.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.1 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственный контракт № 14.740.11.0201 от 15 сентября 2010 г.) по направлению «Океанология».

Литература

1. *Малинин В.Н.* О современных изменениях климата и уровня Мирового океана. Вопр. промысловой океанологии, Вып.3. М., Изд. ВНИРО, 2006, 145–159.
2. *Малинин В.Н.* Изменчивость глобального водообмена в условиях меняющегося климата. Водные ресурсы, 2009, т. 36, №1, с.1–14.
3. *Малинин В.Н., Гордеева С.М., Шевчук О.И.* Изменчивость уровня Мирового океана за последние 140 лет. Ученые записки РГГМУ, 2007. Вып. 4. С. 125–132.
4. *Малинин В.Н., Шевчук О.И.* Эвстатические колебания уровня Мирового океана в современных климатических условиях. Изв. РГО, 2008, Т.140, Вып.4, с.20–30.
5. *Brohan, P., et al.,* 2006: Uncertainty estimates in regional and global observed temperature changes: A new dataset from 1850. J. Geophys. Res., 111, D12106, doi:10.1029/2005JD006548.
6. *Church J.A. and White N.J.* A 20th century acceleration in global sea-level rise // Geophysical Res. Letters. 2006, V. 33, L01602, doi:10.1029/2005GL024826.
7. *Domingues, C. M., J.A. Church, N.J. White, P.J. Gleckler, S.E. Wijffels, P. M. Barker, J.R.* Dunn. Improved estimates of upper-ocean warming and multi-decadal sea-level rise // Nature. 2008. 453. Pp.1090– 1095.
8. *Hansen, J., et al., 2001*: A closer look at United States and global surface temperature change. J. Geophys. Res., 106, 23947–23963.
9. HADCRUT3 Global/Temperature data (HadCRUT3 and CRUTEM3)/ Data available from CRU/Climatic Research Unit. URL:http://www.cru.uea.ac.uk/ cru/data/temperature/hadcrut3gl.txt
10. HADSST2 Global/Temperature data (HadCRUT3 and CRUTEM3)/ Data available from CRU/Climatic Research Unit. URL: http://www.cru.uea.ac.uk/ cru/data/temperature/hadsst2gl.txt
11. IPCC, 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Climate Change Fourth Assessment Report Climate Change 2007. [Bernstein L., et al.(eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 940 pp.
12. *Ishii, M., and M. Kimoto.* Reevaluation of historical ocean heat content variations with time-varying XBT and MBT depth bias corrections// J. Oceanogr. 2009 (in press).
13. *Jevrejeva S., Grinsted A., Moore J.C., Holgate S.* Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records // J. Geophys. Res. 2006, V. 111. C09012, doi:10.1029/2005JC003229.
14. *Levitus S., J. I. Antonov, T. P. Boyer, R. A. Locarnini, H. E. Garcia, A. V. Mishonov*. Global ocean heat content 1955–2008 in light of recently revealed instrumentation problems // Geophys. res. lett. 2009. Vol. 36. L07608, doi:10.1029/2008GL037155.
15. *Lugina, K.M., et al.,* 2005: Monthly surface air temperature time series area-averaged over the 30-degree latitudinal belts of the globe, 1881–2004. In: Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, US Department of Energy, Oak Ridge, TN, http://cdiac.esd.ornl.gov/trends/temp/lugina/lugina.html.
16. *Smith, T.M., and R.W. Reynolds,* 2005: A global merged land and sea surface temperature reconstruction based on historical observations (1880–1997). J. Clim., 18, 2021–2036.

Работа выполнена в рамках мероприятий 1.2.1. и 1.3.1 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственные контракты № П726 и П1223) по направлению «Океанология».

ЭКОЛОГИЯ

В.В. Дроздов

ОСОБЕННОСТИ МНОГОЛЕТНЕЙ ДИНАМИКИ ЭКОСИСТЕМЫ АЗОВСКОГО МОРЯ ПОД ВЛИЯНИЕМ КЛИМАТИЧЕСКИХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ

V.V. Drozdov

FEATURES OF LONG-TERM DYNAMICS OF AN ECOSYSTEM OF SEA OF AZOV UNDER THE INFLUENCE OF CLIMATIC AND ANTHROPOGENOUS FACTORS

Проанализирована многолетняя изменчивость показателей биологической продуктивности и абиотических компонентов экосистемы Азовского моря. Установлена степень и характер связей между крупномасштабными климатическим изменениями и гидрологическими процессами в Азовском море и его бассейне, влияющими на динамику видового состава водных биоценозов, их продуктивность и устойчивость всей морской экосистемы. В качестве показателей климатических изменений использовались индексы Северо-Атлантического колебания (NAO) и данные по параметрам Сибирского антициклона. Обобщены сведения о влиянии антропогенной деятельности, связанной с гидростроительством и токсическим загрязнением отдельных акваторий. Сформулированы рекомендации по рациональной эксплуатации водных и биологических ресурсов.

Ключевые слова: Азовское море, морская экосистема, динамика биопродуктивности, экотоны, климат, гидрологический режим.

Long-term variability of indicators of biological efficiency and abiotic components of an ecosystem of sea of Azov is analysed. Degree and character of communications between large-scale climatic changes and hydrological processes in sea of Azov and its pool, influencing dynamics of specific structure of water biocenoses, their efficiency and stability of all sea ecosystem is established. As indicators of climatic changes indexes of North Atlantic fluctuation (NAO) and the data on parametres of the Siberian anticyclone were used. Data on influence of the anthropogenous activity connected with hydrobuilding and toxic pollution of separate water areas are generalised. Recommendations about rational operation of water and biological resources are formulated.

Keywords: sea of Azov, marine of ecosystem, dynamics of a bioproductivity, an ecotons, a climate, a hydrological mode.

Введение

Азовское море расположено на юге Европейской части России и принадлежит к бассейну Атлантического океана. Площадь Азовского моря составляет 39 тыс. км^2, объём – 290 км^3, средняя глубина – 7 м. В последние два десятилетия экосистема Азовского моря, а также весь регион в целом, включающий бассейны рек Дон и Кубань, находятся в состоянии неблагоприятной экологической обстановки, оцениваемой для ряда районов и акваторий как кризисная. Основными причинами сложившейся ситуации является нерациональное использование водных и биологических ресурсов, отсутствие учёта при планировании хозяйственной деятельности специфики связей между климатическими гидрологическими, океанологическими изменениями, недостаточная разработанность прогностических сценариев изменчивости важнейших показателей морской экосистемы.

Азовское море – уникальный природный объект. С древнейших времен это море славилось не только большими уловами, но и обилием видового состава его обитателей. Древние греки, основавшие несколько крупных колоний на берегах Азова в VI–V вв. до н.э. называли этот водоем Меотида, что значит «кормилица». В последующие века неизменным спросом пользовались такие азовские деликатесы, как осетровые, керченская и донская сельдь, шемая, судак и лещ, а также рыбец и тарань. В 1930-е гг. совокупные уловы промысловых рыб Азовского моря достигали около 300 тыс., что с учетом весьма небольшой площади моря является одним из самых высоких показателей рыбопродуктивности в водах Мирового океана. Однако вторая половина XX в. стала началом широкомасштабного антропогенного преобразования экосистемы Азовского моря. В бассейнах Дона, Кубани и других приазовских рек появилось множество искусственных водохранилищ. Эти обширные по площади испарители пресной воды используются для нужд орошаемого земледелия, охватывающего пространства в сотни тысяч гектаров. В интересах агротехники осуществляется снегозадержание на полях. Большое количество речной воды забирается для промышленных и бытовых целей.

Зарегулирование двух крупнейших рек бассейна Азова – Дона и Кубани снизило ежегодный приток пресной воды в Азовское море на 15 км^3 или на 37 % от прежних объемов поступлений. Обильные весенние паводки на Дону стали большой редкостью. Теперь они бывают один раз в пять–семь лет. С 1952 г., после запуска Цимлянского гидроузла, все нерестилища белуги оказались отрезанными от моря. На 80 % были уничтожены нерестилища осетра, на 50% – севрюги и сельди. В итоге ценные породы рыб лишились созданных природой мест естественного размножения, существовавших не менее 200 тысяч лет. Рост изъятия пресных вод для хозяйственных целей в последующие годы на фоне естественного снижения увлажнённости территории, обусловили значительное сокращение пресного стока в море и возрастание поступления черноморских вод. В результате, с 1967 г. началось увеличение солёности моря и к концу 1970-х гг. её значения достигали 15–18 ‰ в южных районах и 7–10 ‰ в северо-

восточных, в среднем для моря составляя около 13,8 ‰, что привело к росту вертикальных градиентов солёности и плотности воды, ухудшило условия аэрации в придонных горизонтах [3, 4]. Существенно изменился состав фауны моря, в составе которой стали преобладать преимущественно морские малоценные виды рыб, а пресноводные виды рыб, составляющие ранее основу промысла, резко сократили свою урожайность и ареалы, что привело к падению суммарных уловов в море в 3–4 раза [9]. Существенно сократились площади ареалов нереста и нагула ценных карповых рыб: леща, тарани, рыбца. Резко сократились уловы судака [8, 13]. В последующие годы (1978–1982), наблюдалась преимущественно климатообусловленное увеличение увлажненности бассейна Азовского моря, что привело к понижению солености Азовского моря до 10,9 ‰, т.е. до величин оптимальных для рыбного хозяйства. В 1980-х гг. возросло загрязнение речных и морских вод пестицидами, фенолами и нефтепродуктами. В конце 1980-х и начале 1990-х гг. зафиксировано проникновение и массовое развитие чужеродных для местной экосистемы видов планктонофагов, что способствовало дальнейшему ухудшению экологической обстановки, снижению экономического потенциала региона и росту напряжённости в социальной сфере [9].

Существенное снижение притока пресной воды в море усугубляется сбросом неочищенных сточных вод, загрязненных токсичными веществами искусственного происхождения, которые слабо расщепляются микроорганизмами, обитающими в Азовском море. По заключению специалистов АзНИИРХ и ММБИ [9], Азовское море к настоящему времени значительно сократило способность к самоочищению и сдерживанию чрезмерных антропогенных нагрузок. Загрязнение моря неочищенными стоками привело к усилению его эвтрофикации. Интенсивно загрязняются илы и грунт, особенно в Таганрогском и Темрюкском заливах. Учащаются массовые заморы рыбы в низовьях Дона и Кубани.

Разложение продуктов нефтепереработки, отходов промышленного производства, сельскохозяйственной и бытовой химии в зараженных донных отложениях производят токсические бактериальные микроорганизмы. Этот естественный процесс не отличается высокой скоростью, а конечные продукты разложения, потребляемые водорослями, трудно перерабатываются аборигенными видами рыб. Для решения этой проблемы специалисты воспользовались особенностями кормовой базы дальневосточного пеленгаса – разновидности кефали. Эта рыба способна расщеплять и перерабатывать токсические бактериальные организмы и водоросли, превращая их в легко усвояемую органику, которая, в свою очередь, быстро минерализуется благодаря мелководности моря и хорошей прогреваемости его вод. Разведение пеленгаса, завезенного в Азово-Черноморский бассейн в 1960-е г., несколько снизило остроту проблем, связанных с очисткой придонного пространства от токсических загрязнений. Местная популяция пеленгаса вошла в число основных промысловых объектов.

К числу дополнительных источников загрязнения Азовского моря относятся водный транспорт и дноуглубительные работы, обеспечивающие его нор-

мальное функционирование на мелководье. Судоходство вызывает взмучивание илистых грунтов, разрушение лесозащитных полос у размываемых берегов рек, загрязнение акваторий нефтепродуктами. Влияние водного транспорта на экосистему Азовского моря достаточно велико: через прорытые по мелководьям судоходные каналы здесь ежегодно проходит порядка 7000 судов [9].

В начале XXI в. экосистема Азовского моря потенциально начала подвергаться новому воздействию, связанному с вводом в строй Ростовской АЭС. При отсутствии аварийных ситуаций на Ростовской АЭС низовья Цимлянского водохранилища и р. Дон, а также Таганрогский залив неизбежно испытают на себе последствия теплового загрязнения. В случае же возникновения чрезвычайных ситуаций возможно ожидать также и быстрого радионуклидного загрязнения, так как в качестве водоема-охладителя АЭС используется естественный залив, отгороженный от Цимлянского моря грунтовой дамбой.

Исторические данные свидетельствуют, что еще триста лет назад в России хорошо понимали важность заботы о водных ресурсах. В 1698 г. Петр I издал указ об очистке р. Дон. Указом 1719 г. за засорение Невы и других рек Петербурга предусматривалась ссылка на каторжные работы. За затопление балласта с кораблей виновные в первый раз подвергались штрафу, а повторная провинность вела к конфискации корабля. За последнее десятилетие в России принят ряд федеральных законов, указов президента, постановлений правительства и ведомственных нормативных актов, регулирующих отношения по природопользованию и охране окружающей среды. Для улучшения экологической ситуации в регионе приняты «Программа неотложных мер по оздоровлению окружающей среды Ростовской области на 1994–1996 годы» и «Программа действий по охране окружающей среды для Ростовской области на период до 2000 года». Однако их практическое воплощение оставляет желать лучшего. Неочищенные или плохо очищенные стоки из населенных пунктов по-прежнему сбрасываются в ближайшие водоемы, угрожая не только их рыбным запасам, но и безопасности и здоровью населения.

Таким образом, в Азовском море и в его бассейне к настоящему времени накопился значительный груз нерешенных экологических проблем, с каждым годов все более и более выводящий уникальную экосистему Азовского моря из состояния равновесия. Требуется срочная разработка и реализация новой комплексной научно обоснованной программы по восстановлению параметров экосистемы Азова на основе учета климатических, гидрологических и биопродукционных закономерностей, а также специфики промышленного и сельскохозяйственного производства в бассейне.

1. Климатические особенности региона

Климат Азовского моря относится к континентальному климату умеренных широт. Для региона характерна умеренно мягкая, короткая зима и теплое продолжительное лето. Сезонные изменения погоды на Азовском море формиру-

ются под влиянием крупномасштабных синоптических процессов. В осенне-зимнее время на Азовское море воздействует отрог сибирского антициклона. Это обусловливает ярко выраженное преобладание северо-восточных и восточных ветров со средней скоростью 4–7 м/с. Усиление интенсивности этого отрога вызывает сильные, до штормовых, ветры, сопровождающиеся резким похолоданием. Среднемесячная температура воздуха в январе составляет –2...–5°С, однако во время северных и северо-восточных штормов она может понижаться до –25 °С. В весенне-летнее время на Азовское море в значительной степени подвергается воздействию центров действия атмосферы над Северной Атлантикой, в основном влияние оказывает отрог Азорского максимума давления. Для этого периода характерно преобладание маловетреной, безоблачной и теплой погоды. Ветры неустойчивы по направлению, их скорость незначительна (3–5 м/с). Часто наблюдается полный штиль. Весной над морем наблюдаются средиземноморские циклоны, которые сопровождаются юго-западными ветрами со скоростью 4–6 м/с [4]. Прохождение атмосферных фронтов вызывает грозы и кратковременные ливни. Летом воздух над морем сильно прогревается, в июле среднемесячная температура воздуха равна 23–25 °С.

Благодаря большому количеству поступающей солнечной радиации Азовское море имеет довольно высокую среднюю годовую температуру воды 11,5 °С. В июле–августе температура воды достигает 24–25 °С, а у берегов может превышать 30 °С. Зимой температура воды равна или близка к точке замерзания. В периоды наибольшего охлаждения (январь–февраль) и наибольшего прогревания (июль–август) поля значений температуры воды обладают малой контрастностью. В весенний переходный сезон (апрель–май) вследствие влияния глубин на прогревание воды ее температура заметно повышается от центральных районов моря к прибрежным. Осенью (октябрь–ноябрь) вследствие разностей теплозапасов на различных глубинах отмечается обратная картина: температура воды понижается от открытого моря к прибрежным районам. Интенсивное ветро-волновое перемешивание вод при малых глубинах моря способствует выравниванию температур от поверхности до дна. Перепад температур во всей толще воды в среднем не превышает 1 °С [4].

В среднем за многолетний период на поверхность Азовского моря выпадает 418 мм осадков в год. Распределение осадков по акватории моря неравномерное. Наибольшее количество выпадает в северо-восточном (Таганрогский залив) и восточном (Приморско-Ахтарск) районах моря. При этом в течение всего года количество осадков, выпадающих на побережье, превышает количество осадков, выпадающих на поверхность моря. В сезонном ходе количества осадков выделяется зимний максимум, составляющий 28–39 % от годового количества, и летний (июнь–июль) максимум, составляющий 21–29 %. На рис. 1 представлена многолетняя динамика значений атмосферных осадков выпадающих на поверхность Азовского моря в целом [4, 9]. Заметна выраженная межгодовая неоднородность в объемах выпадающих осадков и многолетни тенденции. За анализируемый пе-

риод времени выделяются следующие наиболее заметные периоды повышенных значений осадков: с 1932 по 1948, 1956–1958, 1966–1970, 2002–2003 гг.

Таким образом, климатическая ситуация в Азово-Черноморском регионе находится в уникальной зависимости от совокупного воздействия весьма различных климатообразующих центров: Северной Атлантики, Сибирского антициклона и Средиземноморского циклонического центра. Причем роль каждого из них значительно меняется в зависимости от сезона года. Поэтому при анализе влияния климатических параметров на гидрологический и гидрохимический режимы Азовского моря необходимо использовать несколько индексов, отражающих процессы циркуляции атмосферы над различными регионами. На рис. 1 представлена многолетняя динамика величин атмосферных осадков на поверхность Азовского моря. Заметна значительная межгодовая и многолетняя изменчивость. Выделяется период, соответствующий повышенным величинам осадков с 1932 по 1947 гг. Наиболее выраженная тенденция к сокращению осадков имела место в период с 1971 по 1990 г. Наиболее низкие значения были установлены для 1929, 1954 и 1990 гг. Выполненный спектральный анализ данных по осадкам показал, что наиболее существенные периоды изменений соответствуют в порядке убывания значимости 6,8, 7,4, 8,2, 27 и 82 году.

Рис. 1. Многолетняя динамика величин атмосферных осадков на поверхность Азовского моря

2. Гидрологический и гидрохимический режим

Характер гидрологических и гидрохимических процессов в Азовском море формируется под воздействием речного стока, водообмена с Черным морем, заливом

Сиваш и климатических процессов. Существенную роль играет мелководность моря. Значительный объем суммарного пресного речного стока, составляющий в среднем около 50 км^3/год, существенный объем атмосферных осадков и ограниченное поступление черноморских вод через Керченский пролив обусловливают низкую соленость вод моря, которая примерно в 1,5 раза ниже солености чер-

номорских вод и почти в 3 раза ниже океанических. В Азовское море впадают две крупные реки – Дон и Кубань, суммарный расход которых составляет до 90 % общего стока в море и около 20 мелких. В табл. 1 представлены данные о составляющих водного баланса Азовского моря за период с 1920 по 1990 г. [1, 4, 9].

Таблица 1

Среднемноголетний водный баланс Азовского моря (км^3/год)

Приходная часть	
Речной сток	37,1
Осадки	15,5
Приток из Черного моря	36,7
Приток из залива Сиваш	0,4
В с е г о	89,7
Расходная часть	
Испарение	34,6
Сток в Черное море	53,6
Сток залив Сиваш	1,5
В с е г о	89,7

На рис. 2 показана многолетняя изменчивость значений суммарного речного стока в Азовское море [2, 4, 9]. Заметно, что имеет место выраженная межгодовая и многолетняя изменчивость. Определен значимый отрицательный тренд, свидетельствующий о наличии общей долговременной тенденции к снижению водности в бассейне Азовского моря. Однако в период с 1926 по 1933 и с 1941 по 1943 г. значения суммарного стока значительно превосходили норму. Выделяется также исключительно маловодный период с 1972 по 1976 г., в течение которого суммарный сток оценивался не более чем в 26 км^3, что составляет примерно половину от многолетней нормы. Выполненный спектральный анализ данных показал, что наиболее существенными для колебаний суммарного стока являются в порядке убывания значимости периоды 13, 16, 20 и 5 лет. Очевидно, столь значительные колебания водности бассейна способны оказывать важное влияние на режим солености акваторий Азова и поступление биогенных веществ в море.

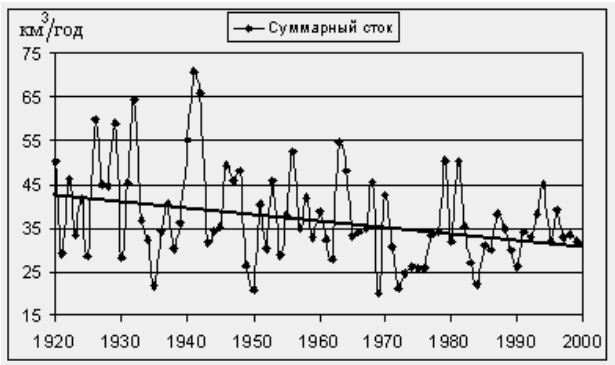


Рис. 2. Многолетняя динамика величин суммарного речного стока в Азовское море. Жирной линией показана линия тренда

Пространственное распределение солености характеризуется значительными горизонтальными градиентами в Таганрогском заливе, особенно в его восточной части, и на взморье Кубани. В центральной части моря соленость меняется с северо-востока на юго-запад в значительно меньшей степени. Вследствие малого объема моря и большой временной изменчивости речного стока межгодовые изменения солености могут достигать 1 ‰ и более, а многолетние – свыше 4 ‰. По причине замедленного водообмена с Чёрным морем через Керченский пролив [1] и значительного поступления пресных речных вод, солёность моря в среднем в настоящее время не превышает 11 ‰, а в наиболее опреснённом Таганрогском заливе составляет от 3 до 8 ‰. На рис. 3 представлена многолетняя изменчивость солености в Азовском море в целом и в Таганрогском заливе [9]. Как видно из представленных графиков, колебания солености воды в Азовском море и в Таганрогском заливе во многом синхронны (r = 0,74 при P = 99 %), периоды подъема и снижения совпадают. Однако для Таганрогского залива заметна более высокая степень межгодовой изменчивости, что непосредственно связано с динамикой параметров стока Дона. Воды открытой части моря характеризуется большим постоянством солевого состава. За анализируемый период времени наиболее ярко выделяются период экстремально низких значений солености воды – с 1923 по 1932 г. и период особо повышенных значений – с 1973 по 1979 г., что согласуется с особенностями динамики речного стока. Основной ионный состав вод открытой части моря отличается от солевого состава океана относительной бедностью ионов хлора и натрия и повышенным содержанием преобладающих компонентов вод суши: кальцием, карбонатами и сульфатами.

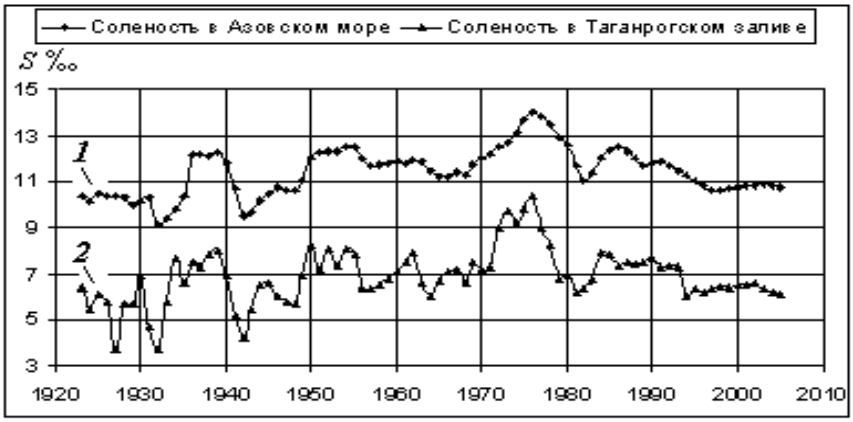


Рис. 3. Многолетняя изменчивость солености воды в среднем по Азовскому морю (1) и в Таганрогском заливе (2)

Под влиянием антропогенных факторов на фоне общего повышения суммарного содержания минеральных солей в водах рек Дона и Кубани, питающих Азовское море, увеличилось вдвое относительное содержание сульфатов, хлоридов и щелочных металлов в речных водах.

Объем поступления биогенных веществ с речными водами зависит от климатических и антропогенных факторов и представляет собой наиболее изменчивый элемент приходной части баланса. Безвозвратное изъятие речных вод, а также зарегулирование стока Дона и Кубани изменили скорости поступления биогенных веществ в Азовское море и трансформировали их качественный состав. После зарегулирования Дона в его водах резко возросло содержание азота, а содержание фосфора уменьшилось. Характерной тенденцией современной динамики биогенных веществ в водах рек, питающих Азовское море, является также снижение содержания общего фосфора и рост содержания азота. При этом трансформация биогенного стока рек характеризуется не только его сокращением, но и весьма резким нарушением его внутренней структуры, что выражается в изменении соотношений в нем азота и фосфора. Пространственное распределение и сезонная динамика фосфорсодержащих соединений в Таганрогском заливе и собственно в море формируются под воздействием речного стока, продукционных процессов и процессов седиментации. Сезонный ход концентрации фосфатов в Таганрогском заливе не подчиняется определенной закономерности. Вертикальные градиенты концентраций фосфатов наиболее характерны для лета. В отдельные годы, отличающиеся низким содержанием кислорода, вертикальные градиенты концентраций фосфатов достигают около 100 мкг/л. В периоды стагнации восстановительные условия, возникающие в контактной зоне, способствуют миграции в воду значительной части обменного фонда фосфора, находящегося в донных осадках. Соединения фосфора в Азовском море находятся в основном в форме органических соединений. Относительное содержание минеральных форм фосфора составляет в среднем 12 % при колебаниях 6–40 % [2, 9].

Источниками пополнения неорганическими формами азота в морских водах являются речной сток и атмосферные осадки, переход биогенных веществ из донных отложений при возникновении анаэробных ситуаций, биохимические процессы деструкции и хемосинтеза органического вещества. Уменьшение концентраций различных форм минерального азота обусловлено в основном их потреблением в процессах фото- и хемосинтеза. Пространственное распределение минеральных компонентов азота в целом характеризуется локализацией максимальных концентраций ионов аммония, нитритов и нитратов в Таганрогском заливе, особенно в его устьевой части. По направлению к морю концентрация минеральных форм азота постепенно снижается. Благодаря развитию фитопланктона в теплый период года потребление минеральных форм азота весьма существенно возрастает и содержание нитритов иногда снижается до количеств, лимитирующих развитие жизни в море. Пространственное распределение органического азота характеризуется незначительными вариациями его концентраций по акваториям, но максимум концентраций отмечается в Таганрогском заливе. В собственно Азовском море в сезонном аспекте наблюдается постепенное увеличение концентрации органического азота от весны к осени [4, 9].

3. Динамика биопродукционных показателей

Рассмотрим многолетнюю изменчивость биологической продуктивности важнейших компонентов биоценозов Азовского моря. На рис. 4. представлена многолетняя динамика первичной продукции (фитопланктона) Азовского моря в целом (*а*) и биомассы зоопланктона (*б*) [9, 12] в сравнении с изменчивостью солености воды. Статистический анализ тесноты связи данных биопродукционных параметров с соленостью воды показал наличие значимой связи отрицательного характера ($r = -0{,}43$ и $r = 0{,}41$ при $P = 99$ %). Это может свидетельствует о том, что на фоне возрастания солености морской воды происходит перестройка в планктонном сообществе, сопровождающаяся угнетением и сокращением продуктивности традиционных доминирующих видов, адаптированных к жизни в условиях пониженной солености (от 8 до 11 ‰). В период интенсивного повышения солености воды с 1973 по 1979 г. (до 14 ‰) наблюдалось снижение первичной продукции в 2–3 раза, а общей биомассы зоопланктона – в 2,5–3,2 раза.

а

б

Рис. 4. Сравнение многолетней динамики значений первичной продукции (*а*) и общей биомассой зоопланктона в собственно Азовском море (*б*) с соленостью воды

На рис. 5 показана многолетняя динамика уловов основных промысловых видов Азовского моря [2, 8, 9, 13]. Как видно из рис. 5, *а*, в середине 1930-х гг. отмечались очень высокие уловы судака и леща. В этот же период были высокими и уловы других карповых рыб: тарани, рыбца. Однако уже ко второй половине 1940-х гг. уловы этих рыб снизились в 3–4 раза. В дальнейшем, на фоне роста значений солености и загрязнением нерестилищ с середины 1950-х по 1980-е гг. уловы рыб, принадлежащих к континентальному солоновато-водному комплексу продолжали быстро падать. Известно, что взрослый судак может нагуливать при достаточно больших значениях солености, до 7–8 ‰, но для успешного выживания его икры соленость не должна превышать 1,5–2 ‰. Это справедливо и для большинства карповых рыб, генетически связанных с пресноводными водоемами суши, но выработавших определенные адаптации к жизни в солоноватой воде внутренних морей [10, 14]. С середины 1950-х по 1980-е гг. уловы рыб, принадлежащих к континентальному солоновато-водному комплексу, продолжали быстро падать. Поэтому рост значений солености выше допустимых пределов резко сократил ареал нагула и зимовки судака и карповых рыб, а нарушение естественного гидрологического режима и загрязнение среды в устьевых зонах рек, служащими для них нерестилищами, столь сильно повлияло на урожайность и уловы. К этому очевидно добавилось влияние пищевого фактора – сокращение традиционной зоопланктонной кормовой базы молоди.

Уловы генетически морских видов рыб – мелких представителей семейства сельдевые (рис. 5, *б*) демонстрируют значительные межгодовые колебания, с периодом около 15 лет, но выраженная единая тенденция изменения их урожайности и уловов не проявляется. Тюлька и хамса созревают в основном уже на второй год жизни, поэтому для данных видов практически всегда свойственна значительная межгодовая изменчивость урожайности поколений и уловов. Тем не менее, максимальные за анализируемое время величины суммарных уловов морских рыб были зарегистрированы в период наибольшего осолонения Азова – с 1972 по 1979 г. Ареалы морских рыб располагаются преимущественно в центральных, юго-западных и южных районах моря, более близких к Керченскому проливу и регулярно затрагиваемых поступлением трансформированных высокосоленых вод из Черного моря. Хамса использует Азов, прежде всего, как ареал кормления, прибывая сюда в массе весной из Черного моря, где проходит ее зимовка. Наличие указанной периодичности в величинах уловов может свидетельствовать о зависимости численности морских рыб от соответствующей периодичности интенсивных и длительных затоков черноморских вод в Азовское море, на фоне ослабления речного стока. Кроме того, резкое снижение уловов морских рыб, наблюдавшееся в начале 1990-х гг. и продлившее, как минимум, до 2000 г., может быть объяснено вселением и массовым развитием в Азовском море интрудуцента-планктонофага гребневика *Mnemiopsis leidy*, резко сократившем численность кормового планктона морского происхождения.

а

б

Рис. 5. Многолетняя динамика основных промысловых рыб Азовского моря:
а – судака и леща; *б* – тюльки, хамсы

Обобщая и анализируя данные о динамике пространственного распределения солености воды как важнейшего экологического фактора среды в условиях Азовского и других внутренних морей, а также сведения о расположении ареалов генетически морских и генетически пресноводных континентальных видов рыб, можно прийти к построению соответствующих пространственных схем их распределения в зависимости от режима солености. Согласно существующей концепции «критической солености биологических процессов» [14], разработанной на примерах экосистем внутренних морей, значения солености воды от 7 до 8 ‰ являются условной границей между континентальной пресноводной – солоновато-водной фауной и морской. Именно эти значения солености способны определить пространственную дифференциацию соответствующих водных биоценозов. Данный подход нашел свою реализацию применительно, в частности, к экосистеме Балтийского моря [6, 7]. На границе разнородных сообществ формируется более или менее обширная переходная зона, которую называют экотоном. Применительно к экосистеме Азовского моря выделение зон экотонов и установление временной динамики их параметров представляется целесообразным в силу наглядности представления обобщенной информации об из-

менчивости ее главных биотических и абиотических компонентов. Кроме того, знание положения зоны экотона, и тенденции ее изменения, способно помочь и в оптимизации рыбного промысла.

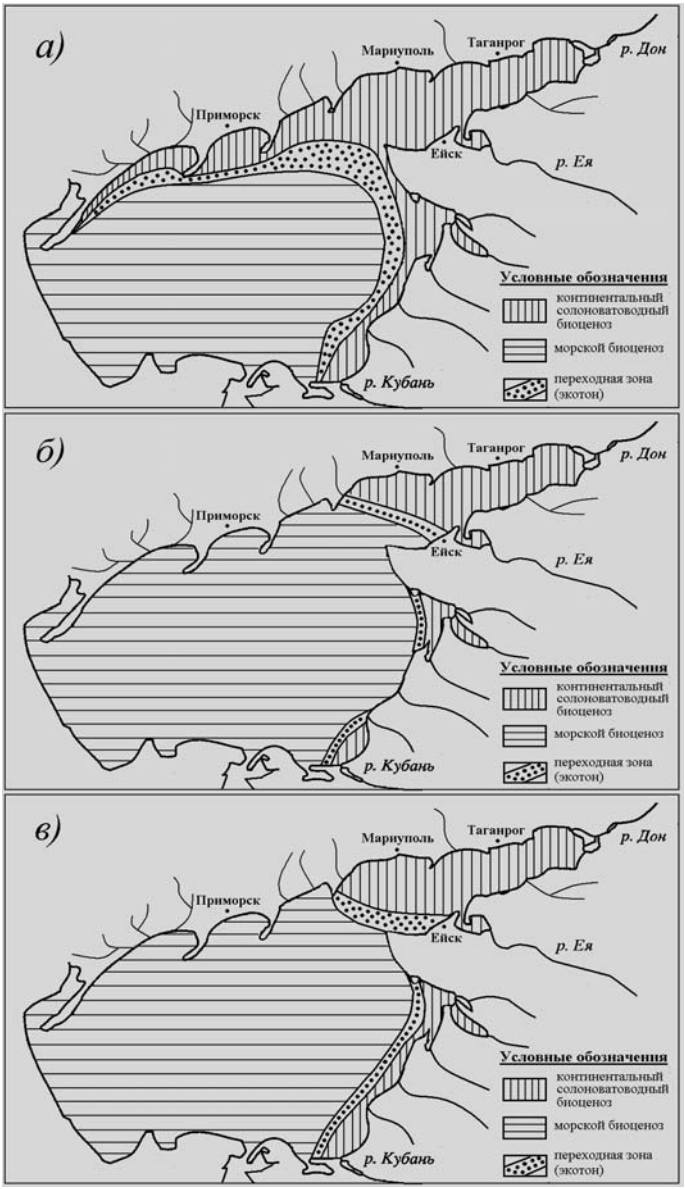


Рис. 6. Схема динамики расположения двух основных типов биоценозов Азовского моря: континентального солоновато-водного и морского с обозначением переходной зоны между ними (зоны экотона): *а* – 1936–1951 гг.; *б* – 1974–1976 г. *в* – 2000–2004 гг.

На рис. 6 представлены примерные обобщенные границы ареалов гидробионтов принадлежащих к солоновато-водным и морским биоценозам Азовского моря. Границы ареалов, протяженность и ширина зоны взаимодействия между ними определены исходя из концепции «критической солености» и соответствуют положению изогалин 7 и 8 ‰ [4, 9]. Как видно из рис. 6, *а*, в период с 1936 по 1951 г. ареал обитания представителей континентального солоновато-водного биоценоза, в состав которого входили ценные виды карповых рыб, занимал не менее 40 % от всей площади моря. Имелись достаточные участки для их размножения в устьевой зоне рек и непосредственно в заливах, в районах с соленостью до 2 ‰, а также для нагула взрослых особей в солоноватых водах до 5–8 ‰. По сути, соленосные условия на всей прибрежной зоне моря на севере, северо-востоке и востоке, включая практически полностью Таганрогский залив и значительную часть Темрюкского залива, были достаточны для успешного развития судака, тарани, рыбца, карпа. Наиболее широкая зона экотона, очевидно, располагалась на выходе из Таганрогского залива, вбирающего в себя воды крупнейшей реки бассейна Азова – Дона. Ареал обитания представителей морского биоценоза, в основном черноморского происхождения, в рассматриваемый период времени располагался преимущественно в южных, юго-западных и центральных районах моря. В целом, такая ситуация соответствовала увеличению водности рек в бассейне Азовского моря, значительному возрастанию поступления пресных вод, существенному подъему за счет этого уровненной поверхности моря и отсутствию интенсивных и продолжительных затоков черноморских вод. Во многом именно поэтому в середине 1930-х гг. уловы рыб пресноводного – солоновато-водного биоценоза достигали максимума (рис. 5, *а*).

На рис. 6, *б* представлено расположение обобщенных границ биоценозов континентального солоновато-водного и морского комплексов. Заметно, что к середине 1970-х гг. ситуация значительно изменилась. Произошло резкое климатообусловленное снижение водности рек в бассейне Азовского моря. Положение усугубилось вводом в эксплуатацию водохранилищ на Дону (Цимлянское, 1952 г.) и р. Кубани (Краснодарское, 1972 г.). Существенные потери воды происходили за счет испарения с обширных акваторий водохранилищ, а также по причине строительства большого количества ирригационных каналов и забора воды на орошение полей. В итоге, суммарный сток в Азовское море сократился в этот период до 25 км^3/год, что составляет около половины от нормы. Естественным следствием этих процессов стало значительное повышение солености воды в Таганрогском заливе и в Азовском море в целом (рис. 3). В результате ареалы представителей континентального солоновато-водного комплекса весьма значительно сократились, а акватории, занимаемые морскими биоценозами, расширились. Успешное размножение и нагул промысловых карповых рыб и судака теперь стало возможным только непосредственно в устьевой зоне крупных рек и в вершине Таганрогского залива. Переходные сообщества экотонов стали занимать меньшие площади, границы между разнородными

по соленосным условиям существования биоценозами сузились. В результате, уловы ценных карповых рыб резко упали, а мелкие морские представители промысловой ихтиофауны, прежде всего тюлька и хамса, демонстрировали резкий рост своей урожайности и уловов.

Схема, представленная на рис. 6, *в,* отражает площади, которые могли бы занимать представители пресноводно-солоновато-водного и морского биоценозов, близкие к современному этапу развития экосистемы Азовского моря, на основе данных о распределении солености воды [4]. Водность рек в бассейне моря к началу XXI в несколько возросла, что могло бы положительного сказаться на воспроизводстве карповых рыб и судака, но по причине высокой степени загрязнения воды устьях рек, разрушения традиционных нерестилищ в процессе гидростроительных работ их уловы продолжают оставаться на весьма низком уровне. Осетровые породы, некогда составлявшие особую гордость региона, также в настоящее время не могут полноценно самостоятельно воспроизводиться по причине загрязнения районов нерестилищ в низовьях рек или отсутствия доступа к ним. Проблему усугубляет хищническое браконьерство, и несмотря на работу нескольких осетроводческих производств и массовый выпуск молоди в море, увеличения численности стада осетровых в Азовском море достичь пока не удается.

Таким образом, мы видим, что компоненты экосистемы Азовского моря весьма динамичны. Пограничный характер значений «критической солености» способен быстро приводить к изменениям в составе доминирующего биоценотического комплекса и влиять на его успех воспроизводства его представителей, в том числе экономически важных видов промысловых рыб, на значительной площади акватории моря. В связи с этим, возникает необходимость установить крупномасштабные причины происходящих изменений с целью возможного предвидения развития ситуации.

2. Анализ влияния крупномасштабных параметров циркуляции атмосферы на гидрологические и океанологические характеристики региона Азовского моря

Климат Северной, Центральной и Южной Европы в значительной мере зависит от атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой, которая представлена системами низкого и высокого давления. Центральная часть циклонической системы низкого давления обычно располагается к юго-западу от о. Исландия. Южнее Исландского минимума давления, в районе Азорских островов, находится центр антициклонической системы высокого давления, получивший название Азорского максимума давления. Данные системы называют центрами действия атмосферы, которые формируют также соответствующие вихревые структуры в океане [11]. Благодаря ним, в умеренных широтах над Северной Атлантикой постоянно осуществляется перенос воздушных и поверхностных водных масс и тепловых потоков с запада на восток. Интенсивность переносов

в атмосфере и в океане подвержена значительным колебаниям во времени вследствие того, что параметры центров действия, т.е. их положение в пространстве и интенсивность, изменяются во времени весьма заметно. Изменения их интенсивности определяют не только интенсивность зональной циркуляции, но, как показано в [11], и интенсивность меридиональных переносов воздушных масс и в атмосфере и поверхностных вод в океане. В качестве степени интенсивности переносов воздушных, водных масс и тепла принимают разность атмосферного давления на станциях, расположенных около климатических центров действия. Эту разность давления, определяемую, как правило, в среднем за зимние месяцы, называют Северо-Атлантическим колебанием (North Atlantic Oscillation – NAO). Индекс атмосферной циркуляции NAO широко используется в отечественной и мировой практике изучения колебаний климата и их причин. Среди других подходов к оценке атмосферной циркуляции индекс NAO имеет некоторые преимущества, что и является причиной его широкого признания. Расчёт индекса NAO происходит по разности конкретных значений давления воздуха на постах наблюдений, что позволяет оценить интенсивность атмосферной циркуляции, темп ее изменчивости во времени. Кроме того, индекс NAO рассчитывается по разности давлений воздуха на уровне моря, что позволяет иметь более точное представление о специфике происходящих метеорологических процессов в непосредственной близости от расположения морских и наземных экосистем.

Существуют различные варианты индекса NAO. Наиболее часто используется разность давления между Азорскими островами (Понта-Делгада) и Исландией (Акурейри), осредненная за три зимних месяца (декабрь–февраль) – индекс NAO_1. Представляют его непосредственно в единицах давления (гПа) или в виде отклонения от среднего в долях дисперсии. Несколько реже используют разности давления между пунктами Лиссабон (Португалия) и Стиккисхоульмюр (Исландия), осреднённые за четыре зимних месяца (декабрь–март) – NAO_2. Кроме того, для характеристики Северо-Атлантического колебания применяют непосредственную разность давлений между центрами действия атмосферы – NAO_3, а также разности давления на меридиане, между точками с координатами 45 º с.ш., 30 º з.д. и 60 º с.ш., 30 º з.д., осреднённые за три зимних месяца (декабрь–февраль) – NAO_4. В работе [11] был разработан обобщенный индекс Северо-Атлантического колебания (NAO об.) представляющий собой первую главную компоненту разложения четырех наиболее распространенных индексов NAO на естественные ортогональные функции (ЕОФ). Данный индекс показал высокую эффективность при анализе взаимосвязей между климатическими и гидрологическими процессами в регионе Северной Европы [6] и в Северной Атлантике в целом [11].

Достаточно эффективным является также традиционный метод использования в качестве показателей климатических колебаний форм атмосферной циркуляции Вангенгейма-Гирса [5], широко используемый в обобщающей работе [9].

Самыми главными особенностями изменчивости интенсивности атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой за последнее столетие можно считать её исключительное ослабление в 1960-е г. и весьма значительный рост в конце 1980-х – начале 1990-х гг., что находит свое подтверждение в характере колебаний значений всех индексов NAO. В 1960-е гг. резко снизился западный зональный перенос в умеренных широтах, был сильно ослаблен перенос теплых воздушных масс к северу над северо-востоком Северной Атлантики и холодных воздушных масс в южном направлении над северо-западом. В дальнейшем, начиная со второй половины 1980-х г., наблюдалось развитие тенденции к возрастанию интенсивности зональной циркуляции, которое никогда ранее не проявлялось в столь значительных масштабах.

На фоне долгопериодных колебаний интенсивности атмосферной циркуляции заметны также её вариации с периодом от 16 до 20 лет. Спектральный же анализ изменчивости индекса NAO показал, что наиболее заметным на спектре является максимум на периоде 7,8 года. Значимого тренда за период около 100 лет в интенсивности циркуляции атмосферы над регионом Северной Атлантики не обнаружено.

Сибирский антициклон формируется над восточной Сибирью, Якутией и близлежащими областями. Наибольшая активность выражена в осенне-зимний период. Известно, что географическое положение Сибирского антициклона подвержено значительной временной изменчивости и его отроги способны достигать Кавказа, побережья Черного и Азовского морей. Поэтому исследование влияния данного центра действия атмосферы на климат региона Азовского моря представляется целесообразным.

Произведён комплексный анализ взаимосвязей между климатическими, гидрологическими и океанологическими процессами в Азовском море и его бассейне. Результаты корреляционного анализа представлены в табл. 2.

Установлено, что возрастание интенсивности атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой сопровождается снижением температуры воды и воздуха в Азовском регионе, уменьшением количества атмосферных осадков и стока крупнейших рек. В то же время приток высокосолёных водных масс в Азовское море из Чёрного увеличивается по причине некоторого снижения уровня Азова на фоне сокращения речного стока. Изменение солёности Азовского моря и прибрежной северо-западной части
Чёрного моря также находится в тесной зависимости от климатических изменений. Как было показано выше, в связи с динамикой солёности воды находятся также и показатели распределения и биопродуктивности организмов морского и пресноводного комплексов. Влияние Сибирского антициклона существенно меньше, чем Атлантики, но вполне заметно. На фоне его развития, как правило, с запаздываем до 1 года, происходит снижение объема стока р. Дон и суммарного стока в Азовское море, увеличивается соленость воды в собственно Азовском море. Очевидно, роль Сибирского антициклона заключается не только в

выхолаживании отдельных территорий Краснодарского края и Ростовской области в осенне-зимнее время, но и состоит во влиянии на траектории атлантических циклонов, за счет чего они смещаются несколько к северу. За счет этого снижается количество атмосферных осадков в бассейне Азовского моря, что, в свою очередь, приводит к росту солености морских вод. Иллюстрациями основных выделенных являются рис. 7, 8, 9.

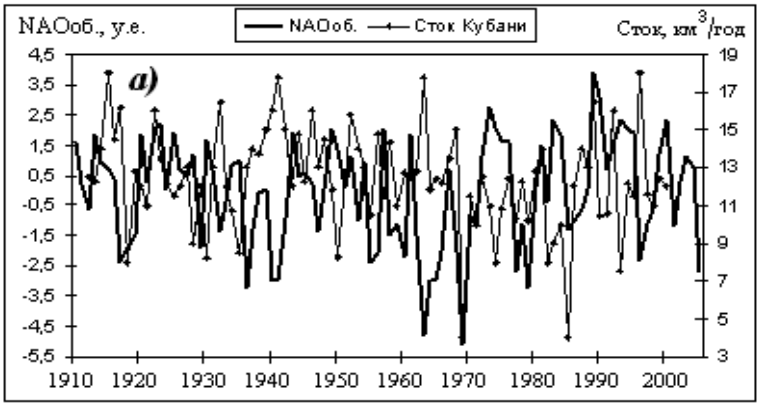
Таблица 2

Коэффициенты корреляции (*r*) между значениями индексов NAO, давлением в центре Сибирского антициклона и гидрометеорологическими условиями в регионе Азовского моря

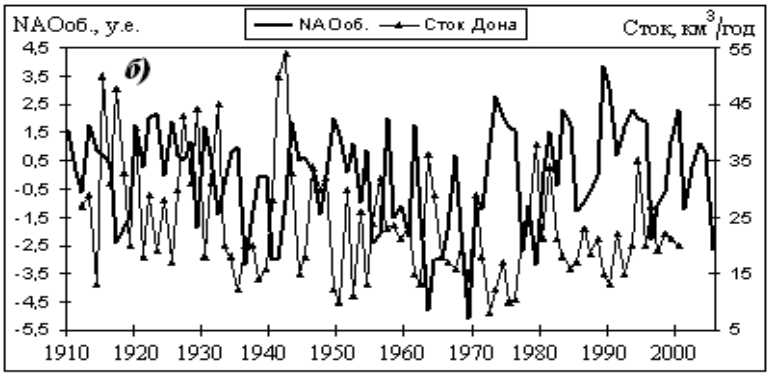
Абиотические условия и факторы	Временной сдвиг относительно климатических индексов, годы	Варианты индексов NAO			Давление в центре Сибирского антициклона
		NAO_1	NAO_2	NAOоб.	
Среднегодовая Т °С воздуха в Ростове-на-Дону	0	–0,52**	–0,55**	–0,57**	–0,33*
	1	–0,34*	–0,46**	–0,37*	–0,16
	2	–0,024	–0,012	–0,031	–0,12
Среднегодовая Т °С воздуха в Керчи	0	–0,48**	–0,52**	–0,47**	–0,25
	1	–0,31*	–0,34*	–0,32*	–0,14
	2	–0,026	–0,022	–0,035	–0,08
Атмосферные осадки на поверхность моря	0	–0,48**	–0,52**	–0,52**	0,087
	1	–0,32*	–0,33*	–0,36*	0,07
	2	–0,022	–0,015	–0,021	0,03
Испарение с поверхности моря	0	–0,35*	–0,41**	–0,42**	– 0,15
	1	–0,25	–0,27	–0,24	– 0,12
	2	–0,031	–0,011	–0,024	0,07
Суммарный речной сток в море	0	–0,45**	–0,56**	–0,54**	–0,26
	1	–0,17	–0,083	–0,123	–0,35*
	2	0,052	–0,012	0,075	–0,21
Средний годовой сток р. Дон	0	–0,52**	–0,61**	–0,56**	–0,24
	1	–0,43**	–0,46**	–0,48**	–0,32*
	2	–0,25	–0,271	–0,281	–0,21
Средний годовой сток р. Кубань	0	–0,48**	–0,51**	0,53**	–0,26
	1	–0,33*	–0,36*	–0,37*	–0,36*
	2	–0,22	–0,202	–0,13	–0,24
Приток водных масс из Чёрного моря	0	0,48**	0,52**	0,53**	0,052
	1	0,36*	0,38*	0,33*	0,12
	2	0,21	0,18	0,19	0,08
Соленость воды в собственно Азовском море	0	0,48**	0,51**	0,52**	0,46**
	1	0,37*	0,35*	0,38*	0,41*
	2	0,12	0,14	0,17	0,34*

Примечания: выделенные знаком «*» значения коэффициентов корреляции соответствуют 95 %-ному уровню обеспеченности; знак «**» соответствует 99 %-ному уровню.

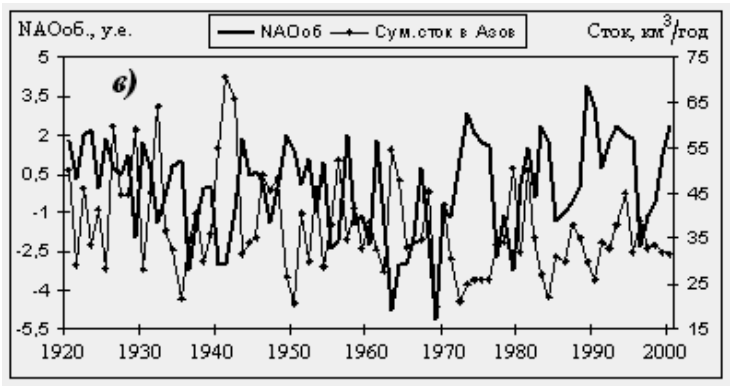
Таким образом, естественные климатические изменения, влияющие прежде всего на сток рек и компоненты солевого баланса морей, являются важнейшей причиной трансформации экосистемы Азова. Установлено, что видовая структура экосистемы Азова и её биопродуктивность весьма уязвимы и находятся в определяющей зависимости от величин пресного стока р. Дон.



а



б



в

Рис. 7. Сравнение многолетней динамки речного стока рек Кубань (*а*), Дон (*б*) и суммарного стока в Азовское море с изменчивостью обобщенного индекса Северо-Атлантического колебания

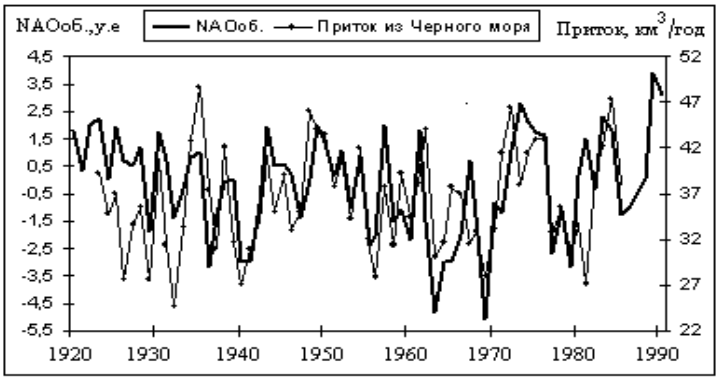


Рис. 8. Сравнение многолетней динамики величин притока черноморских вод в Азов с изменчивостью обобщенного индекса Северо-Атлантического колебания

а

б

Рис. 9. Сравнение многолетней динамики давления в центре Сибирского антициклона с суммарным речным стоком (*а*) и соленостью Азовского моря (*б*)

Заключение

Обобщение и анализ данных о климатических, гидрологических, гидрохимических и промыслово-гидробиологических аспектах динамики экосистемы Азовского моря позволяет сформулировать следующие основные выводы.

1. Речной сток, составляя в современных условиях десятую часть объема Азовского моря, во взаимодействии с температурой и ветром формирует его физико-химический облик в течение 4–6 лет. Содержание азота, кремниевой кислоты, фосфора находится в прямой зависимости от стока рек за рассматриваемый период и соответственно за 3, 2–5 и 5–9 предшествующих лет. Увеличению содержания азота способствуют повышенный температурный фон и пониженная ветровая активность. Концентрации фосфора и кремниевой кислоты возрастают в случае повышения температурного фона и увеличения скорости ветра.

2. Результирующее воздействие климатических и антропогенных факторов в зарегулированных условиях привело к сокращению годового (на 18 %), и особенно, весеннего стока (на 24 %), резкому уменьшению (до 10–15 %) повторяемости благоприятного водного режима на донских и кубанских пойменных и русловых нерестилищах проходных и полупроходных рыб. Соленость Азовского моря повысилась к концу периода, т. е. тренд составил около 0,5–0,6 ‰. Увеличились ее горизонтальные и вертикальные градиенты, уменьшилась интенсивность вертикального обмена энергией и веществом между водными массами за счет турбулентного и конвективного перемешивания. Возросла устойчивость водных масс. Для многолетних колебаний содержания в водной толще Азовского моря азота и отношения N : P характерны положительные тренды, а для аналогичных изменений концентраций фосфора, кремниевой кислоты и первичной продукции – отрицательные. Степень многолетней изменчивости солености, содержания азота и фосфора возросла, первичной продукции – уменьшилась.

3. Рост интенсивности атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой, эффективным индикатором которого является NAO, сопровождается смещением траекторий циклонов на северо-восток Европы, по направлению к бассейнам Балтийского и Белого морей. Снижение интенсивности атмосферной циркуляции над данным регионом приводит к смене направлений переноса тепла и влаги с Атлантики на юго-восток Европы, в бассейны Азовского и Черного морей. В связи с данными тенденциями, происходят соответствующие противоположные значительные изменения в термическом, гидрологическом, океанологическом и гидробиологическом режимах внутренних морей. Наиболее значимыми периодами с точки зрения воздействия климатических изменений на экосистемы внутренних морей за последние 100 лет следует признать 1932–1936, 1972–1977, и 1989–1992 гг.

4. В настоящее время регион Азовского моря продолжает оставаться в депрессивном состоянии, несмотря на наличие огромного экономического потенциала. Для выхода из кризиса требуется разработка стратегии по устойчивому

развитию всего Азово-Черноморского региона, которые должны обязательно учитывать особенности совместного влияния климатических, океанологических, гидрологических и антропогенных процессов и факторов на береговую зону и экосистему морей. Именно такой подход позволит, во-первых, обосновать конкретные эффективные практические шаги, направленные на восстановление продуктивности и экологического благополучия моря и, во-вторых, обеспечит разработку прогноза ожидаемых естественных природных изменений, в строгом соответствии с которыми должна определяться величина природно-ресурсного потенциала отдельных районов и всего региона в целом.

Работа выполнена при поддержке Правительства Санкт-Петербурга (персональные гранты для молодых ученых 2008 – 2009 гг.).

Литература

1. *Альтман Э.Н.* К вопросу об изменчивости расходов воды в Керченском проливе по натурным наблюдениям. // Труды ГОИН, 1976, вып. 132, с. 17–28.
2. *Брофман А.М., Дубинина В.Г., Макарова Г.Д.* Гидрологические и гидрохимические основы продуктивности Азовского моря. Монография. – М.: Пищевая пром-сть, 1979. – 288 с.
3. *Гаргопа Ю.М.* Крупномасштабные изменения гидрометеорологических условий формирования биоресурсов Азовского моря // Основные проблемы рыбного хозяйства и охраны рыбохозяйственных водоемов Азово-Черноморского бассейна. – Ростов-н-Дону: АзНИИРХ, 2000, с. 20–27.
4. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. 5. Азовское море. – Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 237 с.
5. *Гирс. А.А.* Макроциркуляционный метод долгосрочных метеорологических прогнозов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1971. – 230 с.
6. *Дроздов В.В., Смирнов В.В.* Колебания климата и донные рыбы Балтийского моря. – СПб.: изд. РГГМУ, 2008. – 249 с.
7. *Дроздов В.В., Гасанова Э.Г.* Влияние солености воды на состав биоценозов и формирование зон экотонов в Балтийском море // Ученые записки РГГМУ, 2003, № 1.
8. *Зайдинер Ю.И. Попова Л.В.* Уловы рыб и нерыбных объектов рыбохозяйственными организациями Азово-Черноморского бассейна (1990–1995 гг.): Стат. сб. – Ростов-на-Дону: Молот, 1997. – 100 с.
9. *Матишов Г.Г., Гаргопа Ю.М., Бердников С.В.* и др. Закономерности экосистемных процессов в Азовском море. Монография. Южн. науч. центр РАН. – М.: Наука, 2006. – 304 с.
10. *Никольсткий Г.В.* Экология рыб. – М.: 1974. – 368 с.
11. *Смирнов Н.П., Воробьев В.Н., Кочанов С.Ю.* Северо-Атлантическое колебание и климат. – СПб.: изд. РГГМУ, 1998. – 122 с.
12. *Студеникина Е.И., Алдакимова А.Я., Губина Г.С.* Фитопланктон Азовского моря в условиях антропогенных воздействий. Монография. –Ростов-на-Дону: Эверест. 1999. – 175 с.
13. Уловы рыб и нерыбных объектов рыбохозяйственными организациями Азовского бассейна и прилегающих участков Черного моря (1960–1990 гг.). – СПб., 1993. – 172 с.
14. *Хлебович В.В.* Критическая соленость биологических процессов. – Л.: Наука, 1974. – 236 с.

Л.Н. Карлин, А.В. Дикинис, В.Б.Сапунов

КРИТЕРИИ ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ НАГРУЗКИ

L.N. Karlin , A.V.Dikinis, V.B.Sapunov

CRITERIA OF ECOLOGICAL STRESS

Цель работы – рассмотрение подходов к оценке качества природной среды. Выделены уровни рассмотрения биологических систем, для которых оценивается качество среды. Дана классификация вредных веществ в окружающей среде на токсины, тератогены, канцерогены и мутагены. Предложены три подхода к квалиметрии окружающей среды – антропоцентрический, биоценозоцентрический и специоцентрический. Сформулированы пути развития экологической квалиметрии как самостоятельной области гуманитарных и естественных наук.

Ключевые слова: экологическое благополучие, квалиметрия.

The aim of article is toward quantitative assay of ecological environment. Levels of living systems organization are listed. All environment damage pollutions are classified on toxins, cancerogens, teratogens and mutagens. Three approaches to quantitative essay of environment are listed. They are approaches based on comfort for human, species and ecological systems. The ecological quolimetry is considered as a special science both of natural and humanitirian fields.

Keywords: ecological prosperity, qualimetry.

Введение

Современной теоретической и практической экологии характерны две противоречивых тенденции. С одной стороны, общество все больше осознает значение экологических знаний и необходимость решать глобальные экологические проблемы, накопленные к началу третьего тысячелетия. С другой стороны, происходит неоправданная политизация экологии, затрудняющая применение экологических знаний на практике. Одна из причин возможности некорректного использования экологических понятий – отсутствие общепринятых критериев экологического благополучия и неблагополучия. Средства массовой информации манипулируют некорректными понятиями типа «плохая экология», «хорошая экология», подчас выполняя политико-экономический заказ. Цель настоящей работы – выяснить, что такое хорошо и что такое плохо с точки зрения экологии, опираясь на достижения экологической науки. Иными словами, авторы ставят перед собой задачу сформулировать квалиметрические подходы к оценке качества среды, окружающей человека и другие организмы, с целью эффективного решения прикладных задач рационального природопользования.

Критерии, принятые в профилактической медицине

Еще до появления экологии как науки профилактическая медицина ставила и подчас успешно решала вопрос о квалиметрии, т.е. оценке качества среды, окружающей человека с медико-биологических позиций (Минх, 1974, Ноология.., 1996). Именно санитарные врачи разработали такие важные понятия как предельно-допустимая концентрация (ПДК) вредного вещества, предельно допустимая доза (ПДД), которую может принять в свой организм человек или животное, предельно допустимый сброс (ПДС), предельно-допустимый выброс (ПДВ), предельно допустимый уровень (ПДВ – для физических агентов) и т.д. Достоинства этих критериев – отработанность и большой эмпирический задел. Недостатки – отсутствие глубокой теории. В профилактической медицине нет учета взаимодействия веществ, отдаленных последействий, генетической изменчивости популяции. Современная экология ввела понятие синергетических взаимодействий, при которых разные факторы окружающей среды могут при совместном действии на человеческие и иные организмы ослаблять или усиливать друг друга [Петин, 2009; Сапунов, 2010].

Характер действия разных веществ на человека и иные организмы может различаться принципиально. Вредные вещества можно разделить на 4 основные категории по действию на организм – токсины, тератогены, канцерогены, мутагены. Токсины отрицательно действуют на физиологические системы организма, не затрагивая генетический аппарат. Тератогены нарушают работу генетического аппарата, но не нарушают самой генетической программы. Канцерогены затрагивают генетическую программу, вызывая образование злокачественных опухолей. Мутагены вызывают наследственные повреждения – мутации. Таким образом, действие токсинов может проявиться немедленно, тератогенов и канцерогенов с некоторой задержкой, а последствия воздействия мутагенов могут сказаться спустя много поколений. Соответственно, разным должен быть и подход к оценке вредности разных веществ, определения ПДК и ПДД. Такие подходы могут быть созданы только на основе синтеза методов медицины, экологии и генетики. Настоящая работа лежат на пути создания такого синтеза.

Подходы, уровни и способы

Развитие любого региона требует объективной оценки экологической обстановки с применением количественных критериев. Фундаментом разработки таких критериев качества природной среды должна стать глобальная экология и учение о биосфере В.И.Вернадского (1975), рассматривающего все живые организмы как взаимосвязанные элементы единой системы. Для создания универсальных критериев оценки качества природной среды применимы три подхода:

1. Антропоцентрический, основанный на оценке динамики численности населения и динамики продолжительности жизни.

2. Специоцентрический, основанный на анализе состояния одного конкретного биологического вида. Речь может идти либо об охраняемом виде, либо о виде, применяемом в биоиндикации для оценки состояния природной среды.

3. Биоценозоцентрический, основанный на анализе состояния динамики биологической массы и биологического разнообразия.

Сочетания трех подходов и нескольких критериев позволит ввести объективные методы оценки состояния природной среды. Подходы, основанные на применение этих критериев, могут способствовать формированию теоретической основы рационального природопользования. Оценка имеет смысл, только если определен структурный уровень организации, по отношению к которому эта оценка работает. Существует множество структурных уровней организации живой природы. Низший – молекулярный. Высший – биосферный. В настоящей работе рассмотрим вопрос об экологическом благополучии применительно к четырем наиболее значимым уровням – организменному, популяционно-видовому, экосистемному, биосферному.

Существует два основных способа анализа экологического благополучия – по компонентам окружающей среды и по реакции биологических систем. Первый всесторонне разработан профилактической медициной. Второй сформулирован таким важным разделом прикладной экологии, как биоиндикацией, активно разрабатываемой с конца прошлого столетия [Биологическая индикация, 1984]. Особо значение в биоиндикации имеет растительных покров урбанизированных биоценозов [Неверова, 2009]. К биоиндикации примыкает близкий метод – биотестирование. Если в случае индикации анализу подлежат организмы, обитающие в природе, то при тестировании используются искусственные модельные системы – например, аквариумы со стенобионтами, через которые пропускают воду, подлежащую анализу на экологическое качество [Федотов, 1992].

Квалиметрический метод оценки воздействия внешней среды

Охарактеризовать состояние природной среды по всем параметрам невозможно. Поэтому предлагается два подхода.

1. Выявление интегральных характеристик, скоррелированных с возможно большим числом свойств среды. В качестве таких интегральных характеристик воды можно рассматривать мутность, прозрачность, насыщенность кислородом и углекислым газом. Генеральные показатели концентрации биогенов в воде, отражающий формы загрязнения – биологическое потребление кислорода, химическое потребление кислорода. Важную роль так же играет концентрация фосфора, как основного элемента, вызывающего эвтрофикацию воды. Если речь идет о внутренних пресных водоемах и водотоках, то их общее состояние может быть оценено как по химическому потреблению кислорода, так и визуально по степени эвтрофикации и отнесения водоема к одной из возможных категорий (дистрофный, олиготрофный, мезотрофный, эвтрофный, гиперэвтрофный, болото) [Сапунов, 2009].

В качестве интегральной характеристики состояние воздушного бассейна можно рассматривать насыщенность его твердыми частицами, что выявляется по прозрачности, концентрации углекислого газа и угарного газа. Эти газы вы-

деляются в ходе комплекса процессов, абиотической, биотической и социальной природы. Соответственно, концентрации этих газов характеризуют общее состояние воздушного бассейна. В качестве дополнения можно охарактеризовать концентрацию соединений азота на основе разработанных методик, как газа, соединения которого оказывают комплексное влияние на психику человека [Безуглая, Смирнова, 2008, Сапунов, 2008].

В качестве интегральной характеристики состава почв приоритетным должно быть определение в почвах концентрации тяжелых металлов. Данная концентрация является особо значимой для биоты.

2. Альтернативный подход, дополняющий первый – интегральная оценка отклика человека и биоты на весь комплекс воздействий со стороны внешней среды. Иными словами, предполагается оценивать результирующий эффект действия разных по направлению и удельному весу факторов среды с учетом возможностей биологического гомеостаза и ассимиляционной емкости экологических систем. Интегральные характеристики, отражающие состояние человеческой популяции – продолжительность жизни, доля мертворожденных детей и детей с наследственными дефектами. Индикаторами так же могут стать изученные организмы, обитающие в пределах городской среды. Индикатором загрязнения вод служат организмы – стенобионты, частная экология которых предусматривает высокие требования к качеству вод – некоторые виды ракообразных, двустворчатых моллюсков, стрекоз. Индикатором загрязнения воздушной среды могут быть насекомые, частная феногенетика которых хорошо изучена. Например, некоторые виды кокцинелид (божьих коровок), жужелиц. Хорошо известно, что в загрязненных районах преобладают меланизированные формы двухточечной божьей коровки – Adalia bipunctata [Лусис 1973, Сапунов, 1999]. Индикатором оценки состояния, как воздушной среды, так и почв может служить состояние древесной растительности, доля растений, имеющих тератогенные нарушения (дихотомия, трихотомия, искривление ствола у древесных, нарушение структуры початка у кукурузы) [Сапунов, Дикинис, 2010]. Применение этих относительно несложных по исполнению, но наукоемких по содержанию подходов может быть основой для комплексной оценки состояния природной среды в рассматриваемом регионе.

Квалиметрия, как наука об оценке качества, уже приобрела статус самостоятельного направления науки. Один из лидеров этого направления – А.И. Субетто [1992, с. 159] определил задачу экологической квалиметрии следующим образом. «Экологическая квалиметрия осуществляет различные типы индикации и картографирования загрязнений экосистем в регионе, в том числе разрабатывает методы расчета комплексных показателей и индексов качества… Механизм экологических оценок должен включать индикационные методы измерения и оценки, в том числе биоиндикацию, радиометрическую индикацию, индикацию по генетическим заболеваниям человека, индексы качества питьевой воды, уровень очистки сточных вод, уровень чистоты производства в регионе и др., а так же методы вероятностно-статистических оценок».

Индексная квалиметрия (Яйли, 2008, Яйли, Музалевский, 2005) способна дать число, вариации которого указывают на увеличение или уменьшение экологически значимой величины, не допускающей точного измерения.

В подходе, развиваемом в ряде работ (Потапов и др., 2005), индекс – это величина, построенная из индикаторов. Иначе говоря, индикаторы являются теми элементарными кирпичиками, из которых формируются индексы. Под индикатором понимается численное значение измеряемой величины, мера параметра процесса. Количественно индикатор подсчитывается по формуле:

$$\beta_i = (M_i - F_i) / C_i$$

В этой формуле C_i – измеренная концентрация ЗВ, i – его номер, M_i – эффективное значение концентрации конкретного ЗВ, например, это может быть ПДК рабочей зоны и т. д. F_i – фоновое значение.

Качество окружающей среды или ее отдельных компонентов может быть оценено на основе сопоставления признаков качества контролируемой системы с системой, выступающей в роли эталона. Для проведения такой оценки качества необходимо наличие контроля и опыта, т.е. присутствия рядом с исследуемым объектом достаточно чистого участка не урбанизированной территории, экологические параметры которой можно рассматривать как базовые. Согласно методологии экспериментального анализа, контроль и опыт должны отличаться одним параметром. В данном случае – степенью экологического давления. В пределах "чистой", контрольной территории (желательно, имеющей статус особо охраняемой) за уровень отсчета можно принять ее основные экологические характеристики в случае, если оценивается химическая составляющая, например, концентраций по одному из следующих вариантов:

1) фоновые значения концентраций по всем измеряемым ингредиентам,
2) значения ПДК,
3) значения, равные разности ПДК и фоновых концентраций соответствующих ингредиентов.

К проблеме оценки качества среды примыкает проблема оценки риска и экологической опасности как меры риска. Экологическая опасность (D) – угроза изменения состава или свойств окружающей среды, либо появление изменений, связанных с возникновением в ней нежелательных процессов, обусловленных антропогенным воздействием. Смысл данного определения – вероятностный. Это значит, что диапазон изменений этой величины также меняется от 0 до 1.

Экологическая безопасность – S = 1/D – величина, обратная экологической опасности. Диапазон изменений будет соответственно (1 – ∞).

Приемлемый уровень риска ($R_{пр.}$) соответствует численному значению равному $R_{пр.}$ = 0,3–0,4. Риски выше этих значений следует рассматривать как неприемлемые. Уровень экологической безопасности**,** отвечающий уровню приемлемого риска равен S = 2.5 – 3,3.

Основные теории, описывающие дальнейшее развитие биосферы в зависимости от антропогенного влияния, делятся на две группы.

1. Теории глобальных кризисов, которые являются развитием неомальтузианства – т.е. современной редакцией теории Мальтуса. В числе лидеров этого направления можно указать американского эколога Пола Эрлиха, французского ученого и популяризатора Жака Кусто. Эти теории проповедуют неизбежность наступления серии глобальных кризисов по мере роста населения и научно-технического прогресса [Тайерни, 1989].

2. Теории рога изобилия, утверждающие, что ресурсы Земли и ближнего космоса (например, солнечная энергия) превышают сколь угодно растущие потребности человечества. Лидерами этого направления можно считать американского экономиста Ю. Саймона, датского математика Б. Ломборга [Lomborg, 2002] и др., [Сапунов, 1998а, б].

Сторонники группы теорий "глобальных кризисов" говорят о необратимом разрушении биосферы Земли, вызванном деятельностью человека. Но в соответствии с принципами глобальной экологии, основанной Вернадским, ни один из вымирающих видов не оставляет после себя свободного места. Оно сразу же заполняется другими видами. При этом в большинстве случаев вымирание оказывается мнимым. Дело в том, что наряду с известными и распространенными видами на планете существует множество "скрытых видов", численность которых достаточна для самоподдержания, но мала для устойчивой фиксации их методами полевой экологии. При освобождении экологической ниши доминировавшем в ней прежде видом, скрытые виды быстро размножаются и заполнять брешь в биосфере. При этом геометрическая прогрессия размножения дает возможность заполнить сколь угодно большую нишу за считанное число поколений [Сапунов, 1998а]. Высокую стабильность биосферы обеспечивают:

Большие адаптивные возможности особей, входящих в состав любой популяции, реализуемые в течение онтогенеза.

Высокая потенциальная изменчивость любого вида, возможность подключения дополнительных источников повышения изменчивости при попадании популяции в неблагоприятную среду [Сапунов, 1996].

Мощь геометрической прогрессии размножения, впервые оцененная Мальтусом и в ее биологических последствиях, описанная Дарвином.

4. Многообразие видов в биоценозах, среди которых могут оказаться приспособленные к любым условиям.

Таким образом, программы, связанные с повышением глобальной устойчивости биосферы и обеспечением поддержания биологического разнообразия в масштабах всей планеты путем определенной международной демографической политики, следует считать необоснованными. Эти процессы управляются силами, неподконтрольными человеку. Можно говорить о региональном экологическом контроле, ибо в отдельных регионах ситуация может меняться в неблагоприятную для человека сторону, и этими процессами в каких-то пределах можно управлять.

Биосфера – предельно устойчивая структура, живущая по своим не до конца познанным законам. Глобальные нарушения ей, безусловно, не грозят. Соот-

ветственно, перейдем от биосферного уровня к тем уровням, квалиметрический анализ которых может быть эффективным.

Организменный и популяционно-видовой уровни

Принятые в санитарной медицине нормативы ПДК и прочие, по сути, отражают качество окружающей среды для индивидуального среднестатистического организма. Понятие биологической изменчивости здесь отсутствует.

Перейдем к популяционно-видовому уровню. Разберем некоторые аспекты применения специоцентрического подхода. При этом определяющим становится благополучия конкретного вида. В качестве такого может выступать как охраняемый вид, так и индикаторный вид-стенобионт, экологическое потребности которого коррелируют с экологическими потребностями человека. В качестве таких индикаторных видов, в случае, если речь идет о чистоте водоема, могут выступать ракообразные, живущие только в чистой воде [Федотов, 1992].

Каждый вид характеризуется определенным разнообразием морф и популяции. В подавляющем большинстве случае их количественное разнообразие описывается распределением Гаусса.

Количественное разнообразие популяции – необходимое условие устойчивости. Для стабильной популяции среднее значение ± 2 средних квадратичных отклонения охватывает 95% всей численности популяции. За этими пределами находятся 5% патологических особей. Именно такая доля ненормальных особей – неизбежная плата за поддержание необходимого уровня адаптивных потенций популяции. Попытка определения количественных значений, свидетельствующих о благополучном или неблагополучном состоянии популяции, была предпринята в предыдущих работах (Сапунов, 1988). Благополучной может считаться популяция, в которой коэффициент вариации по большинству признаков – $CV = \sigma / \mu$ находился близко к 0.1 и доля атипичных форм была близка к 5%. Если эти значения превышались – идет адаптация к неблагоприятным условиям. Если популяционные значения были ниже приведенные выше, значит, популяция оказывалась чрезмерно специализированной и неготовой адаптироваться к возможным изменениям среды. Обстановка может рассматриваться как экологически неблагополучная, если разнообразие морф в изучаемой популяции растет по сравнению с оптимумом. Если разнообразие понижено – популяция может рассматриваться как адаптабильная только к узким пределам изменения среды.

Рост биомассы и численности любого вида ограничены. Изменение численности любой биологической популяции проходит через несколько стадий. На первой стадии численность неизменна. На второй стадии наблюдается рост числа организмов со скоростью геометрической прогрессии. На третьей стадии вновь наблюдается стабилизация численности на достигнутом уровне. Наконец, может наступить 4-я стадия – сокращение численности, которая, однако, в природных условиях обычно не опускается до нуля.

Отсюда формируется антропоцентрический подход к оценке качества природной среды. Он основан на оценке динамики численности населения. Если население растет или не сокращается, то ситуацию можно считать относительно благополучной. Динамика численности населения определяется двумя параметрами – рождаемостью и средней продолжительностью жизни (а также функционально связанной смертностью). Рождаемость в определенный момент развития популяции неизбежно начинает падать, причем это может происходить и в результате роста и в результате снижения уровня жизни. Увеличение продолжительности жизни происходит в результате роста уровня жизни. Таким образом, если в регионе средняя продолжительность жизни (ПЖ) растет или не сокращается, то экологическую ситуацию в регионе следует считать благоприятной. Назовем такой подход к оценке качества природной среды **антропоцентрическим.** По аналогии можно выделить **специоцентрический** подход, основанный на анализе состояния популяции одного вида, который является либо охраняемым для данной территории, либо индикаторным, через состояние которого оценивается качество среды. Если для вида численность не имеет тенденции к снижению, то экологическое состояние относительно благополучно.

Специфика оценки благополучия для вида Человек разумный

Эволюционный успех или неуспех для любого биологического вида, включая Человека разумного, определяется динамикой его численности. Она – суть взаимоотношений рождаемости, смертности и продолжительности жизни. Высшая цель любого исследования и любой практической деятельности – благо человека. Главные показатели экологического и социального благополучия человека – динамика численности и средней продолжительности жизни. Она определяется взаимодействием социальных и экологических факторов окружающей среды.

Продолжительность жизни – один из демографических параметров, который наиболее корректно оценивает качество жизни. Различают индивидуальную, максимальную, видовую, среднюю продолжительности жизни. Индивидуальная продолжительность жизни – срок от рождения до смерти конкретного человека. Максимальная индивидуальная продолжительность жизни отражает видовые особенности, характеризуют биологическую норму реакции по рассматриваемому параметру. Для человека максимальная достоверно зарегистрированная индивидуальная продолжительность жизни находится в пределах 113 – 121 год [Бердышев, 1989]. Видовая продолжительность жизни – это средний максимальный возраст, достигаемый представителями данного вида при наиболее благоприятных условиях существования, т.е. срок жизни, который ограничивается только генетическим своеобразием особей данного вида. Для человека это 95 лет – срок, который может прожить средний индивид при правильном образе жизни. Видовая продолжительность жизни в первую очередь определяется генетическими факторами и незначительно зависит от средовых факторов.

Средняя продолжительность жизни зависит от социальных, экономических, экологических, медико-биологических условий. В историческом плане средняя продолжительность жизни человека неуклонно возрастает [Агаджанян, 1994].

Уровень экологических систем

Принципиально важный подход для оценки экологического благополучия экосистемы предложили Израэль и Цыбань [1989], введя понятие «ассимиляционная емкость экологической системы». Это – показатель максимальной динамической вместимости количества загрязняющего вещества, которое может быть за единицу времени накоплено, разрушено, трансформировано и выведено за пределы экосистемы без нарушения нормальной ее деятельности. В известной мере это понятие выросло категорий ПДВ и ПДС, рассмотренных выше, путем перевода этих понятий из области профилактической медицины в область экологии.

Состояние биоценоза характеризуется двумя параметрами – биомассой и видовым разнообразием. Простейший подход – оценка биомассы на единицу площади (в первую очередь растительной, т.к. растения составляют 99.2% массы биосферы [Камшилов, 1979, Основы экологии, 1998]. Если биомасса (ВМ) в регионе стала достоверно уменьшаться: dВМ< 0, это признак неблагополучия.

Другая важная характеристика – видовое разнообразие. Его оценка опирается на принцип “Необходимого разнообразия Эшби”, который утверждает, что гомеостатичность системы возможна при некоем минимальном уровне разнообразия входящих в нее элементов. Методы оценки разнообразия менее просты, чем методы оценки биомассы. Во всяком случае, его нельзя оценивать числом видов на единицу площади хотя бы потому, что нет объективных методов такой оценки.

Распределение видов по численности носит характер, изображенный на рис. 1.

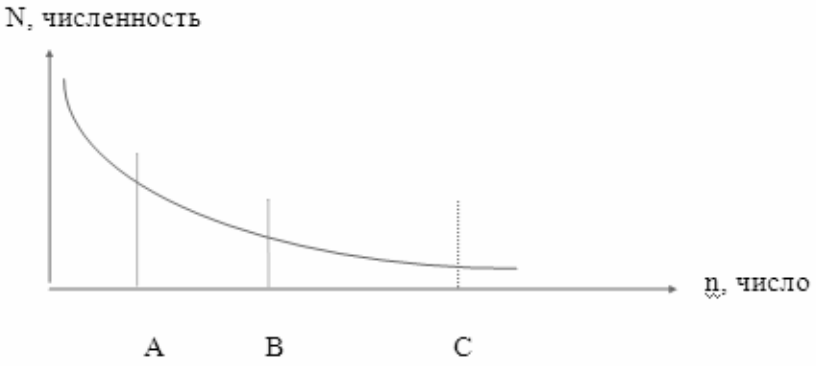


Рис. 1. Распределение видов в биоценозе по численности

Распределение видов по численности описывается уравнением

$$N = D + Ge^{-Hn}, \quad (1)$$

где D, G, H – коэффициенты [Сапунов, 1996]. Точки A, B, C разграничивают три категории видов – доминирующие (определяющие структуру биоценоза) редкие и скрытые, т.е. насколько редкие, что они не могут устойчиво фиксироваться методами полевой экологии. Последних особенно много и среди их разнообразия может выявиться вид, преадаптированный почти к любым изменениям природной среды. Устойчивость биоценоза определяется не абсолютным числом видов, а той их пропорцией, которая обеспечивает должную гомеостатичность экологической системы. При увеличении крутизны спада кривой сокращается разнообразие экосистемы. Более крутой спад свидетельствует о том, что возрастает степень доминирования основных, преобладающих видов и сокращается доля редких и скрытых видов (хотя общее число видов может при этом значительно не измениться). В соответствии принципом необходимого разнообразия Эшби, гомеостатичность любой системы и экологической системы, в частности, в результате снижается. В предыдущей работе [Сапунов, 1998в] была предпринята попытка найти коэффициенты в формуле (1), соответствующие заведомо благополучному биоценозу на материале насекомых Вепсовской возвышенности – наименее затронутого хозяйственной деятельностью места Ленинградской области. Были найдены значения D = 1, G = 138, H = 1. Можно сделать вывод, что при соблюдении достоверности неравенств G > 138 и H > 1 биоценоз снижает устойчивость. В качестве показателей разнообразия (D) ряд авторов [Фрумин, 1998] и др. предлагают использовать широко известную формулу Шеннона, исходно оценивающую количество информации в системе:

$$D = -\Sigma p_i \log_2 p_i ,$$

где p – доля i-го вида в биоценозе. Достоверное снижение показателя разнообразия свидетельствует о снижении уровня устойчивости системы. Второй вариант оценки степени разнообразия – через значение коэффициента H в формуле (1). Его достоверное увеличение говорит о увеличении степени доминирования небольшого числа видов и снижении необходимого разнообразия.

Заключение

Природная среда непрерывно меняется. При этом изменения, вызванные естественными причинами, обычно значительнее, чем связанные с социальной деятельностью человека. При любых изменениях среда должна сохранять свою оптимальность для человека и не требовать включения адаптивных резервов, даже если они у человека как вида еще есть. Цель, поставленная настоящей работой, – рассмотрение подходов к оценке качества природной среды. Выделены уровня рассмотрения биологических систем, для которых оценивается качество

среды. Дана классификация вредных веществ в окружающей среде на токсины, тератогены, канцерогены и мутагены. Предложены три подхода к квалиметрии окружающей среды – антропоцентрический, биоценозоцентрический и специоцентрический. Сформулированы пути развития экологической квалиметрии как самостоятельной области гуманитарных и естественных наук. По мнению авторов, генеральная стратегия охраны природы должна основываться не только на сохранении человеческой популяции (какая-то ее часть уцелеет даже после ядерной войны), но на создание благоприятных условий для подавляющего большинства человеческих индивидуумов. Генеральный показатель оптимальности, применяемый в антропоцентрическом подходе к состоянию среды, – средняя продолжительность жизни. Её сокращение в каком-либо регионе свидетельствует об экологическом неблагополучии.

На сегодняшний день еще не существует набора общепринятых критериев экологического качества среды, окружающей человека или иные организмы. Но существующий задел в области профилактической медицины, экологии, генетики и других наук с подключением общей квалиметрии как раздела прикладной математики достаточен для создания таких критериев. Критерии эти должны иметь такой же законодательный характер как традиционные требования профилактической медицины.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.2.1 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственный контракт № П212 от 22 июля 2009 г.) по направлению «Снижение риска и уменьшение последствий природных и техногенных катастроф».

Литература

1. *Агаджанян Н.А.* (1994). Экология человека, Москва.– М., с.183–199 [электронный ресурс]: *библиотека образовательных ресурсов*/Copyright edulib.ru ГУЦБОР Минобразования РФ – Режим доступа к библиотеке www.edulib.ru.
2. *Безуглая Э.Ю., Смирнова И.В.* Воздух городов и его изменения. СПб, Астериом, 2008, 254 с.
3. *Бердышев Г.Д.* Реальность долголетия и иллюзия бессмертия. – Киев: Политическая литература Украины, 1989,с. 54–243.
4. *Васильев С.В.* Воздействие нефтедобывающей промышленности на лесные и болотные экосистемы. Новосибирск, Наука, 1988, 136 с.
5. *Вернадский В.И.* Размышления натуралиста., М., Наука, 1975, 175 с.
6. Биологическая индикация в антропоэкологии. Л., Наука, 1984, 224 с.
7. *Израэль Ю.А., Цыбань А.В.* Антропогенная экология океана. Л., Гидрометеоиздат, 1989, 528 с.
8. *Ильин Л.А.* Реалии и мифы Чернобыля. М., Алара Лимитед, 1994, 446 с.
9. *Камшилов М.М.* Эволюция биосферы. М., Наука, 1979.
10. *Корешкин А.И.* Демография современной России. Славянская АН. С-Пб.1998. 102 с.
11. *Келлер А.А. Кувакина В.И.* Медицинская география. Российская медицинская академия.– СПб.: PETROC, 1999, 194 с.
12. *Козубов Г.М., Таскаев А.И.* Особенности морфогенеза и ростовых процессов у хвойных растений в районе аварии на ЧАЭС // Радиационная биология. Радиоэкология, 2007, т. 47, №2, с. 204 – 223.

13. *Лусис Я.Я.* Таксономические отношения и географическое распределение форм жуков Adalia musland. // Ученые записки ЛГУ им. П.Стучки, 1973, т. 184, вып. 1, с. 90 – 100.
14. *Медков В.М.* Демография.– Ростов-на-Дону: Феникс, 2002, 448 с.
15. *Медоуз Д., Рандерс И.* Пределы роста. 30 лет спустя. М, Академкнига, 2008, 342 с.
16. *Минх А.А.* Справочник по санитарно-гигиеническим исследованиям. М., Медицина, 1974.
17. *Мовчан В.Н.* Экология человека, Санкт-Петербургский государственный университет.– СПб: Издательство СПбГУ, 2004, 292 с.
18. *Неверова О.А.* Применение фитоиндикации в оценке загрязнения окружающей среды // // Биосфера, №1, 2009, с. 82 – 92.
19. Ноология, экология ноосферы, здоровье и образ жизни. С-Пб, Наука, 1996. 268 с.
20. *Орлова И.* (2002). Смертность в современной России: характер и особенности [электронный ресурс]: журнал / институт социально–политических исследований, Российская академия наук (ИСПИ РАН) – 20. Режим доступа www.ispr.ru/JURNAL/jurnal109.html.
21. Основы экологии. Ред. В.Л.Обухов и В.Б.Сапунов. Учебник для средней школы. С-Пб, Спецлит, 1998. 192 с.
22. *Петин В.Г., Жураковская Г.П.* Концептуальные основы синергетического взаимодействия ионизирующих излучений и других факторов окружающей среды // Биосфера, №1, 2009, с. 58 – 64.
23. *Потапов А.И., Воробьев В.Н., Карлин Л.Н., Музалевский А.А.* Мониторинг, контроль, управление качеством окружающей среды. Часть 3. Оценка и управление качеством окружающей среды. Научное, учебно-методическое, справочное пособие. – СПб.: РГГМУ, 2005. – 598 с.
24. *Сапунов В.Б.* Количественная оценка пределов внутривидовой изменчивости // Журн. Общ. Биол., 1986. Т.46. С. 79–798.
25. *Сапунов В.Б.* О возможностях количественной оценки направления микроэволюционного процесса на основе краткосрочного анализа популяции // Биол. Науки, 1988. №4. С. 62 – 68.
26. *Сапунов В.Б.* Человек: взаимоотношение социального и биологического // Гуманитарий, №1, 1995, с. 50–58.
27. *Сапунов В.Б.* Глобальные основы устойчивости биосферы. // Фундаментальные проблемы естествознания, С-Пб, РАН, 1998а, с. 187 – 188.
28. *Сапунов В.Б.* Скрытый экологический резерв биосферы // Региональная экология, 1998б, №1, с. 13–17.
29. *Сапунов В.Б.* Количественный подход к оценке видового разнообразия (на примере насекомых Вепсовской возвышенности) // Региональная экология, 1998в, № 3–4, с. 39–42.
30. *Сапунов В.Б.* О возможности количественной оценки направления микроэволюционного процесса на основе краткосрочного анализа популяции // Биол. науки, 1988, №4, с. 62–68.
31. *Сапунов В.Б.* Критерии экологического благополучия. // Ноология, экология ноосферы, здоровье и образ жизни. С-Пб, Наука, 1996, с. 80–85
32. *Сапунов В.Б.* Инструкция для проведения фенологических наблюдений на территории Ленинградской области // Экологические вести, №1, 1999, с. 20–23.
33. *Сапунов В.Б.* Прогнозирование действия вредных газов на население на основе популяционно-генетического подхода // 5-я межд. Конф. Воздух 2007. Качество воздушной среды, СПб, с. 53–54.
34. *Сапунов В.Б., Дикинис А.В.* Использование городской растительности для оценки экологического качества окружающей среды // Проблемы озеленение крупных городов. Мат. XIII межд. Науч.- практ. Конф. М., 2010, с. 25–27.
35. *Сапунов В.Б., Шикунец Г.Ф., Цюй Чэнцзюнь.* Три составляющих процесса эвтрофикации: динамика биогенов, биомассы и биоразнообразия. Прогноз и управление // Экологическая химия, 2009, т. 18, вып. 1, с. 46–54.
36. *Слука А.Е.* (2000). География населения с основами демографии, М– с. 43–52 [электронный ресурс]: библиотека образовательных ресурсов // Copyright edulib.ru ГУЦБОР Минобразования РФ – Режим доступа к библиотеке www.edulib.ru.
37. *Спиридонов С.И., Алексихин Р.М., Фесенко С.В., Санжарова Н.И.* Чернобыль и окружающая среда, // Радиационная биология. Радиоэкология, 2007, т. 47, №2, с. 196–203.

38. *Субетто А.И.* Творчество, жизнь, здоровье и гармония. М., Логос, 1992, 202 с.
39. *Тайерни Д.* Пари о мировых ресурсах\\ Диалог-США, 1992, №50, с. 60–65.
40. *Федотов В.П.* Разведение раков. С-Пб, Биосвязь, 1986.
41. *Фрумин Г.Т.* Геоэкология: реальность, наукообразные мифы, ошибки и заблуждения.– СПб, РГГМУ, 2006. – 122 с.
42. *Яйли Е.А., Музалевский А.А.* Риск: анализ, оценка, управление. Научное издание. – СПб.: РГГМУ, 2005. – 232 с.
43. *Darwin C.* The origin of species. L-n, J. Murray, 1859.
44. *Gause G.* Struggle for existance. N.Y., A.P., 1934.
45. *Lomborg B.* The skeptical environmentalist. Measuring the real state of the world // Cambridge Univ Press, Cambridge, 2002. 515 p.
46. *Malthus T.R.* An assay of the principle of population. 1798, L-n, J. Johnson, 396 p.

ГЕОФИЗИКА

М.Ю. Белевич

ГРУППОВОЙ АНАЛИЗ МОДЕЛЕЙ ЖИДКОСТИ

M.Yu. Belevich

GROUP ANALYSIS OF THE FLUID MODELS

Рассматриваются групповые свойства различных моделей жидкости, как четырехмерных причинно-обусловленных, так и стандартных трехмерных, и изучается связь свойств симметрии системы уравнений с допущениями, положенными в ее основу. В качестве базовой используется причинно-зависимая модель сжимаемой вязкой бароклинной жидкости, с уравнением диффузии плотности. Все остальные исследуемые здесь модели, в том числе и стандартные, являются ее частными случаями. Полученные результаты сравниваются с известными свойствами симметрии для уравнений Навье-Стокса и Эйлера.

Ключевые слова: групповой анализ, симметрии, модели жидкости.

Symmetry properties of different three and four-dimensional causal fluid models are considered and the connection between symmetries of the system of equations and general assumptions is studied. The causal compressible viscous baroclinic fluid model with the mass density diffusion equation is used as the most general one. All the rest of the models, the standard model including, are particular cases. The results obtained are compared with known symmetry properties of the Navier-Stokes and Euler equations.

Keywords: group analysis, symmetries, fluid models.

1. Введение

Наряду с причинной обусловленностью явлений в физике существует ряд фундаментальных представлений о пространстве, времени, мерах и пр. Так, в соответствии с современной точкой зрения физическое пространство однородно и изотропно, а время однородно. Абсолютные значения мер в природе отсутствуют и для оценки свойств изучаемого объекта его нужно сопоставить с другим объектом, выбранным в качестве эталона. Эти представления отражаются на тех математических моделях, которые строятся для описания физического мира. Так, однородность пространства и времени позволяет выбирать в качестве начала отсчета любое событие – пару (момент времени, точка пространства), а изотропность пространства и равноправие сторон – произвольную ориентацию координатных осей. Указанный произвол является вместе с тем и

предписанием модели объекта, претендующей на адекватность, оставаться справедливой в любой системе координат. Аналогично, отсутствие абсолютных значений мер позволяет выбирать произвольную систему единиц, а значит, и модель должна допускать подобный произвол.

Все сказанное означает, что модель явления может считаться удовлетворительной в том случае, если она причинно-обусловлена, а также является инвариантной по отношению к выбору:

1) отсчетного (нулевого) момента времени и единицы измерения времени;
2) начала координат и единицы измерения расстояний;
3) ориентации системы координат.

Если эти требования удовлетворяются, то любое решение уравнений модели, полученное в рамках некоторой системы координат и выбранной системы единиц, остается решением тех же уравнений при замене координат и/или системы единиц. В противном случае адекватного описания явления природы с помощью модели получить нельзя, хотя при этом она еще может быть вполне работоспособным вычислительным средством.

Указанная инвариантность означает, что если функция $f(t,\mathbf{x})$, где t – время, а $\mathbf{x}$ – радиус-вектор точки тела, есть решение уравнения модели, то решениями также являются функции, инвариантные по отношению к выбору

1) начала отсчета времени $f(\alpha t + t_0, \mathbf{x})$,
2) начала пространственных координат $f(t, \beta\mathbf{x} + \mathbf{x}_0)$,
3) ориентации осей пространственных координат $f(t, R\mathbf{x})$.

Здесь α, β, t_0 – произвольные вещественные константы, $\mathbf{x}_0$ – произвольный радиус-вектор, а R – произвольная ортогональная 3×3 матрица. Помимо указанной инвариантности, модель должна быть нечувствительна к выбору движущейся системы координат, т.е. должна удовлетворять принципу относительности, предпочтительно Эйнштейна, но хотя бы Галилея.

Свойства инвариантности моделей могут быть получены в результате анализа симметрий соответствующих дифференциальных уравнений. Ниже это делается для различных моделей механики жидкости. Для классических моделей подобные исследования проводились в [Lloyd, 1981] (система уравнений Навье-Стокса) и в [Овсянников, 1978; Olver, 1986] (система уравнений Эйлера).

Работа имеет следующую структуру. В параграфе 2 приводятся необходимые сведения об анализируемых далее моделях механики жидкости. Пункт 3.2 посвящен результатам вычислений допустимых групп преобразований исследуемых уравнений. Последний параграф содержит заключительные замечания.

2. Основная модель жидкости

2.1. Базовые уравнения

Базовой служит причинно-зависимая модель бароклинной вязкой жидкости

$$\rho d_t v^\alpha + \delta^{\alpha\beta}\left(p - \rho\nu \mathrm{div}\vec{v}\right)_{;\beta} = \left(\rho\nu\delta^{\beta\gamma} v^\alpha_{;\gamma}\right)_{;\beta}, \tag{1}$$

включающая вместо уравнения неразрывности уравнение диффузии плотности массы

$$d_t\rho + \rho \mathrm{div}\vec{v} = \mathrm{div}(\nu_\rho \nabla\rho). \tag{2}$$

Здесь $(\cdot)_{;\beta}$ – ковариантная производная по направлению базисного вектора $\vec{e}_\beta$, $\vec{v} = v^\alpha \vec{e}_\alpha$ – вектор скорости, а $\delta^{\alpha\beta}$ – компонента единичного тензора (символ Кронекера). Кроме того, ρ – плотность массы, p – давление, ν – кинематический коэффициент диффузии, ν_ρ – коэффициент диффузии плотности массы.

Используя далее декартовы координаты, запишем базовую модель в виде:

$$\begin{aligned}
c\partial_\tau\rho + v^k\partial_k\rho + \rho(\partial_\tau c + \partial_k v^k) &= \nu_\rho(-\partial_{\tau\tau}\rho + \Delta\rho),\\
c\partial_\tau c + v^k\partial_k c - \frac{1}{\rho}\partial_\tau\left(p - \rho\nu(\partial_\tau c + \partial_k v^k)\right) &= \nu(-\partial_{\tau\tau}c + \Delta c),\\
c\partial_\tau v^j + v^k\partial_k v^j + \frac{1}{\rho}\partial_j\left(p - \rho\nu(\partial_\tau c + \partial_k v^k)\right) &= \nu(-\partial_{\tau\tau}v^j + \Delta v^j),
\end{aligned}$$

где $\partial_\alpha \equiv \partial_{x^\alpha}$, $x^0 \equiv i\tau$, $d\tau \equiv cdt$, $v^0 \equiv ic$, а c – скорость сигнала, с помощью которого проводятся наблюдения движения среды.

2.2. Варианты модели

В качестве вариантов рассматривается ряд упрощений базовой модели. В первую очередь, это касается учета вязкости. В одном случае полагается $\nu_\rho = 0$, т.е. вместо уравнения диффузии плотности используется уравнение неразрывности:

$$c\partial_\tau\rho + v^k\partial_k\rho + \rho(\partial_\tau c + \partial_k v^k) = 0.$$

В другом случае рассматривается идеальная жидкость, $\nu_\rho = \nu = 0$ и уравнения движения записываются в виде:

$$\begin{aligned}
c\partial_\tau c + v^k\partial_k c - \frac{1}{\rho}\partial_\tau p &= 0,\\
c\partial_\tau v^j + v^k\partial_k v^j + \frac{1}{\rho}\partial_j p &= 0.
\end{aligned}$$

Помимо общих случаев исследуются также следующие допущения:

1) скорость распространения сигнала постоянна $c = \mathrm{const}$:

$$
\begin{aligned}
c\partial_\tau \rho + v^k \partial_k \rho + \rho \partial_k v^k &= \nu_\rho(-\partial_{\tau\tau}\rho + \Delta\rho),\\
-\frac{1}{\rho}\partial_\tau\left(p - \rho\nu\partial_k v^k\right) &= 0,\\
c\partial_\tau v^j + v^k \partial_k v^j + \frac{1}{\rho}\partial_j\left(p - \rho\nu\partial_k v^k\right) &= \nu(-\partial_{\tau\tau}v^j + \Delta v^j),
\end{aligned}
$$

2) скорость распространения сигнала бесконечна:

$$
\begin{aligned}
\partial_t \rho + v^k \partial_k \rho + \rho \partial_k v^k &= \nu_\rho \Delta\rho,\\
0 &= 0,\\
\partial_t v^j + v^k \partial_k v^j + \frac{1}{\rho}\partial_j\left(p - \rho\nu\partial_k v^k\right) &= \nu\Delta v^j,
\end{aligned}
$$

3) приближение баротропной жидкости с постоянной скоростью звука c_s, $dp = c_s^2 d\rho$; в этом случае уравнения движения принимают вид:

$$
\begin{aligned}
c\partial_\tau c + v^k \partial_k c - \frac{1}{\rho}\partial_\tau\left(c_s^2\rho - \rho\nu(\partial_\tau c + \partial_k v^k)\right) &= \nu(-\partial_{\tau\tau}c + \Delta c),\\
c\partial_\tau v^j + v^k \partial_k v^j + \frac{1}{\rho}\partial_j\left(c_s^2\rho - \rho\nu(\partial_\tau c + \partial_k v^k)\right) &= \nu(-\partial_{\tau\tau}v^j + \Delta v^j),
\end{aligned}
$$

4) поле скорости бездивергентно ($\partial_\tau c + \partial_k v^k = 0$); при $\nu_\rho = 0$ допущение бездивергентности поля скорости равносильно допущению несжимаемости среды (п. 5):

$$
\begin{aligned}
c\partial_\tau \rho + v^k \partial_k \rho &= \nu_\rho(-\partial_{\tau\tau}\rho + \Delta\rho),\\
c\partial_\tau c + v^k \partial_k c - \frac{1}{\rho}\partial_\tau p &= \nu(-\partial_{\tau\tau}c + \Delta c),\\
c\partial_\tau v^j + v^k \partial_k v^j + \frac{1}{\rho}\partial_j p &= \nu(-\partial_{\tau\tau}v^j + \Delta v^j),
\end{aligned}
$$

5) несжимаемость среды ($d_t\rho = c\partial_\tau\rho + v^k\partial_k\rho = 0$); при этом уравнение диффузии плотности имеет вид:

$$
\rho(\partial_\tau c + \partial_k v^k) = \nu_\rho(-\partial_{\tau\tau}\rho + \Delta\rho),
$$

6) постоянство плотности массы ρ; при этом уравнение неразрывности записывается в виде:

$$
\partial_\tau c + \partial_k v^k = 0,
$$

а также их комбинации.

3. Группы симметрий уравнений механики жидкости

3.1. Симметрии

Группой симметрий дифференциального уравнения называется (см., например, [Olver, 1986]) локальная группа преобразований G, действующая на подмножестве пространства $X \times U$ независимых X и зависимых U перемен-

ных и переводящая решения уравнения в решения же. Другими словами, если $u = u(t, \mathbf{x})$ – решение дифференциального уравнения, а $g \in G$ – некоторое преобразование из группы и действие этого преобразования на решение gu определено, то gu также является решением того же уравнения. Каждый элемент g в окрестности единичного элемента группы можно записать как экспоненту $g = \exp(\mathbf{v})$ для некоторого вектора $\mathbf{v}$ из алгебры Ли $\mathfrak{g}$ группы G. Последнюю можно отождествить с касательным пространством к G в единичном элементе e, замкнутым относительно операции коммутирования. Проходящий через единицу группы поток $g^\sigma = \exp(\sigma\mathbf{v})e$, порождает однопараметрическую подгруппу группы G, а вектор $\mathbf{v}$ оказывается, таким образом, генератором этой подгруппы или ее инфинитезимальной образующей.

Любой элемент $g \in G$ всегда может быть записан как произведение экспонент $g = \exp(\mathbf{v}) \ldots \exp(\mathbf{w})$ для конечного числа векторов $\mathbf{v}, \ldots, \mathbf{w} \in \mathfrak{g}$. Если же n – размерность алгебры и $\{V_i\}_{i=1}^n$ – ее базис, то $\mathbf{v} = \sum_{i=1}^n v^i V_i$, где v^i – компоненты вектора $\mathbf{v}$ в базисе $\{V_i\}$ и $g = \prod_{i=1}^n \exp(v^i V_i)$. Таким образом, группа преобразований G будет группой симметрий дифференциального уравнения, если симметрией будет каждая ее однопараметрическая подгруппа $g_i^\sigma = \exp(\sigma V_i)e$.

Для отыскания максимальной группы симметрий требуется найти и решить переопределенную систему определяющих уравнений и вычислить коэффициенты η^k и φ^a инфинитезимальной образующей $\mathbf{v}$ однопараметрической группы

$$\mathbf{v} = \eta^k \partial_{x_k} + \varphi^a \partial_{u_a}.$$

Здесь $(x_1, \ldots, x_k, \ldots) \in X$ – независимые и $(u_1, \ldots, u_a, \ldots) \in U$ – зависимые переменные задачи. Выражения для коэффициентов η^k и φ^a обычно содержат набор произвольных констант и функций. Количество констант задает размерность соответствующей конечномерной алгебры Ли, а функции определяют бесконечномерные подалгебры. Детали вычислений можно найти, например, в [Olver, 1986].

Вычисления, связанные с групповым анализом, как правило, достаточно трудоемки (нередко требуется решать системы из сотен линейных дифференциальных уравнений в частных производных), но часто могут быть выполнены с помощью специализированных программ, работающих в среде той или иной системы аналитических вычислений. В настоящей работе необходимые вычисления проводились с помощью программы Desolv (release 5, June 2000, авторы K.T.Vu и J.Carminati), работающей в среде Maple V release 5.

3.2. Симметрии моделей жидкости

Здесь используются следующие обозначения инфинитезимальных операторов:

$$
\begin{aligned}
&\textbf{трансляции:} && P_\alpha = \partial_{x^\alpha}, \quad P_i = \partial_{x^i},\\
& && P_t = \partial_t, \quad P_p = \partial_p,\\
&\textbf{пространственные повороты:} && J_i = \varepsilon_{ijk}\left(x^j\partial_{x^k} + v^j\partial_{v^k}\right),\\
&\textbf{преобразования Галилея:} && G_i = t\partial_{x^i} + \partial_{v^i},\\
&\textbf{преобразования Лоренца:} && L_i = x^i\partial_{x^0} - x^0\partial_{x^i} + v^i\partial_{v^0} - v^0\partial_{v^i},\\
&\textbf{растяжения:} && D_\alpha = x^\alpha\partial_{x^\alpha}, \quad D_v = v^\alpha\partial_{v^\alpha},\\
& && D_\rho = \rho\partial_\rho, \quad D_p = p\partial_p,\\
& && D_t = t\partial_t, \quad D_x = x^k\partial_{x^k},\\
& && D_u = v^k\partial_{v^k}.
\end{aligned}
$$

При этом $\alpha \in \{0,1,2,3\}$, $i,j,k \in \{1,2,3\}$, а ε_{ijk} – символ Леви-Чивиты. Рассматриваются следующие варианты модели среды:

вариант I – общий вязкий случай;

вариант II – отсутствие диффузии плотности ($\nu_\rho = 0$);

вариант III – невязкая жидкость ($\nu = 0$).

В табл. 1, 2, 3 и 4 приводятся группы симметрий и их генераторы, вычисленные для различных моделей жидкости. Соответствующие уравнения выписаны в предыдущем разделе.

Для сравнения в табл. 5 приводятся группы симметрий и их генераторы, вычисленные для классических вариантов уравнений идеальной жидкости (уравнения Эйлера) и вязкой жидкости (уравнения Навье-Стокса). Эти результаты совпадают с уже известными и опубликованными.

Таблица 1

Генераторы симметрий четырех мерных (4D) и трехмерных (3D) моделей жидкости

Вариант	а. 4D общий	б. баротропный	в. 4D ($c = \mathrm{const}$)	г. 3D ($c = \infty$)
I.1. общий	P_p, P_α, J_k, L_j, $-D_\alpha + D_v + 2D_p$	P_α, J_k, L_j	P_p, P_α, J_k	$f(t)\partial_p$, P_t, P_i, J_k, G_j, $-2D_t - D_x + D_u + 2D_p$
I.2. бездивергентный	P_p, P_α, J_k, L_j, $-D_\alpha + D_v + 2D_p$	P_α, J_k, L_j	P_p, P_α, J_k	$f(t)\partial_p$, P_t, P_i, J_k, G_j, $-2D_t - D_x + D_u + 2D_p$
I.3. несжимаемый	P_p, P_α, J_k, L_j, $-D_\alpha + D_v + 2D_p$	P_α, J_k, L_j	P_p, P_α, J_k	$f(t)\partial_p$, P_t, P_i, J_k, G_j, $-2D_t - D_x + D_u + 2D_p$
I.4. баротроп.	см. 1.б	—	P_α, J_k	P_t, P_i, J_k, G_j

Таблица 2

Генераторы симметрий четырех мерных (4D) и трехмерных (3D) моделей жидкости (продолжение)

Вариант	а. 4D общий	б. баротропный	в. 4D ($c = \mathrm{const}$)	г. 3D ($c = \infty$)
II.1. общий	$P_p,\ P_\alpha,\ J_k,\ L_j,$ $D_\alpha - D_\rho - D_p,$ $-D_\alpha + D_v + 2D_p$	$P_\alpha,\ J_k,\ L_j,$ $D_\alpha - D_\rho$	$P_p,\ P_\alpha,\ J_k,$ $D_\alpha - D_\rho - D_p$	$f(t)\partial_p,\ P_t,\ P_i,\ J_k,\ G_j,$ $D_t + D_x - D_\rho - D_p,$ $-2D_t - D_x + D_u + 2D_p$
II.2. бездивергентный (несжимаемый)	$P_p,\ P_\alpha,\ J_k,\ L_j,$ $D_\alpha - D_\rho - D_p,$ $-D_\alpha + D_v + 2D_p$	$P_\alpha,\ J_k,\ L_j,$ $D_\alpha - D_\rho$	$P_p,\ P_\alpha,\ J_k,$ $D_\alpha - D_\rho - D_p$	$f(t)\partial_p,\ P_t,\ P_i,\ J_k,\ G_j,$ $D_t + D_x - D_\rho - D_p,$ $-2D_t - D_x + D_u + 2D_p$
II.3. $\rho = \mathrm{const}$	$P_p,\ P_\alpha,\ J_k,\ L_j,$ $-D_\alpha + D_v + 2D_p$	$P_\alpha,\ J_k,\ L_j,$ $-D_\alpha + D_v$	$P_p,\ P_\alpha,\ J_k,$ $D_\alpha - D_\rho - D_p$	$f(t)\partial_p,\ P_t,\ J_k,$ $-2D_t - D_x + D_u + 2D_p$ $\tilde{G}_j = h_j(t)\partial_{xj} + h'_j(t)\partial_{vj} -$ $-\rho x^j h''_j(t)\partial_p,$
II.4. баротроп.	см. 1.б	—	$P_\alpha,\ J_k,\ D_\alpha - D_\rho$	$P_t,\ P_i,\ J_k,\ G_j,$ $-D_t - D_x + D_p$

Таблица 3

Генераторы симметрий четырех мерных (4D) и трехмерных (3D) моделей жидкости (продолжение)

Вариант	а. 4D общий	б. баротропный	в. 4D ($c = \mathrm{const}$)	г. 3D ($c = \infty$)
III.1. общий	$P_p,\ P_\alpha,\ J_k,\ L_j,$ $D_\alpha,\ D_\rho + D_p,$ $D_v + 2D_p$	$P_\alpha,\ J_k,\ L_j,$ $D_\alpha,\ D_\rho$	$P_p,\ P_\alpha,\ J_k,$ $D_\alpha,\ D_\rho + D_p,$ $D_x + D_u - 2D_\rho$	$f(t)\partial_p,\ P_t,\ P_i,\ J_k,\ G_j,$ $D_t + D_x,\ D_x - D_u + 2D_\rho,\ D_\rho + D_p,$ $t(-D_t - D_x + D_u + 5D_p + 3D_\rho)$ $-\sum_i x^i \partial_{v^i}$
III.2. бездивергентный (несжимаемый)	$P_p,\ P_\alpha,\ J_k,\ L_j,$ $D_\alpha,\ D_\rho + D_p,$ $D_v + 2D_p$	$P_\alpha,\ J_k,\ L_j,\ D_\alpha,$ $2f(\rho)\partial_\rho +$ $(\rho f'(\rho) - f(\rho))D_\rho$	$P_p,\ P_\alpha,\ J_k,$ $D_\alpha,\ D_\rho + D_p,$ $D_x + D_u - 2D_\rho$	$f(t)\partial_p,\ P_t,\ P_i,\ J_k,\ G_j,$ $D_t + D_x,\ D_\rho + D_p,$ $D_x + D_u - 2D_p$
III.3. $\rho = \mathrm{const}$	$P_p,\ P_\alpha,\ J_k,\ L_j,$ $D_\alpha,\ D_v + 2D_p$	$P_\alpha,\ J_k,\ L_j,$ $-D_\alpha + D_v$	$P_p,\ P_\alpha,\ J_k,\ D_\alpha,$ $D_x + D_u + 2D_p$	$f(t)\partial_p,\ P_t,\ J_k,$ $D_t + D_x,\ D_x + D_u + 2D_p,$ $\tilde{G}_j = h_j(t)\partial_{xj} + h'_j(t)\partial_{vj}$ $-\rho x^j h''_j(t)\partial_p,$
III.4. баротроп.	см. 1.б	—	$P_\alpha,\ J_k,\ D_x,\ D_\rho$	$P_t,\ P_i,\ J_k,\ G_j,\ D_t + D_x,\ D_\rho$

Таблица 4

Группы симметрий моделей жидкости: $\mathrm{Eu}(1,3)$ – группа Евклида, $\mathrm{G}(1,3)$ – группа Галилея, $\mathrm{P}(1,3)$ – группа Пуанкаре. Надчеркивание обозначает расширение группы за счет растяжений.

Вариант I	а. 4D общий	б. баро-тропный	в. 4D ($c = \mathrm{const}$)	г. 3D ($c = \infty$)
1. общий	$\overline{\mathrm{P}}(1,3)$	$\mathrm{P}(1,3)$	$\mathrm{Eu}(1,3)$	$\overline{\mathrm{G}}(1,3)$
2. бездивергентный	$\overline{\mathrm{P}}(1,3)$	$\mathrm{P}(1,3)$	$\mathrm{Eu}(1,3)$	$\overline{\mathrm{G}}(1,3)$
3. несжимаемый	$\overline{\mathrm{P}}(1,3)$	$\mathrm{P}(1,3)$	$\mathrm{Eu}(1,3)$	$\overline{\mathrm{G}}(1,3)$
4. баротропный	см. 1.б	—	$\mathrm{Eu}(1,3)$	$\mathrm{G}(1,3)$
Вариант II				
1. общий	$\overline{\mathrm{P}}(1,3)$	$\overline{\mathrm{P}}(1,3)$	$\overline{\mathrm{Eu}}(1,3)$	$\overline{\mathrm{G}}(1,3)$
2. бездив. (несжим.)	$\overline{\mathrm{P}}(1,3)$	$\overline{\mathrm{P}}(1,3)$	$\overline{\mathrm{Eu}}(1,3)$	$\overline{\mathrm{G}}(1,3)$
3. $\rho = \mathrm{const}$	$\overline{\mathrm{P}}(1,3)$	$\overline{\mathrm{P}}(1,3)$	$\overline{\mathrm{Eu}}(1,3)$	$\overline{\mathrm{G}}(1,3)$
4. баротропный	см. 1.б	—	$\overline{\mathrm{Eu}}(1,3)$	$\overline{\mathrm{G}}(1,3)$
Вариант III				
1. общий	$\overline{\mathrm{P}}(1,3)$	$\overline{\mathrm{P}}(1,3)$	$\overline{\mathrm{Eu}}(1,3)$	$\overline{\mathrm{G}}(1,3)$
2. бездив. (несжим.)	$\overline{\mathrm{P}}(1,3)$	$\overline{\mathrm{P}}(1,3)$	$\overline{\mathrm{Eu}}(1,3)$	$\overline{\mathrm{G}}(1,3)$
3. $\rho = \mathrm{const}$	$\overline{\mathrm{P}}(1,3)$	$\overline{\mathrm{P}}(1,3)$	$\overline{\mathrm{Eu}}(1,3)$	$\overline{\mathrm{G}}(1,3)$
4. баротропный	см. 1.б	—	$\overline{\mathrm{Eu}}(1,3)$	$\overline{\mathrm{G}}(1,3)$

Таблица 5

Генераторы симметрий классических уравнений гидромеханики. Здесь $f(t)$ и $h_j(t)$ – произвольные функции времени.

система Навье-Стокса: $\overline{G}(1,3)$		
общая	$\rho = \mathrm{const}$	баротропная
$f(t)\partial_p,\ P_t,\ P_i,\ J_k,\ G_j,$ $D_t + D_x - D_\rho - D_p,$ $-2D_t - D_x + D_u + 2D_p$	$f(t)\partial_p,\ P_t,\ J_k,$ $\tilde{G}_j =$ $= h_j(t)\partial_{x^j} + h'_j(t)\partial_{v^j} - \rho x^j h''_j(t)\partial_p,$ $-2D_t - D_x + D_u + 2D_p$	$P_t,\ P_i,\ J_k,\ G_j,$ $-D_t - D_x + D_\rho$
система Эйлера: $\overline{G}(1,3)$		
общая	$\rho = \mathrm{const}$	баротропная
$f(t)\partial_p,\ P_t,\ P_i,\ J_k,\ G_j,$ $D_t + D_x,\ D_\rho + D_p,$ $D_x + D_u + 2D_p$	$f(t)\partial_p,\ P_t,\ J_k,$ $\tilde{G}_j = h_j(t)\ c_s^2\partial_{x^j} +$ $+ h'_j(t)\ c_s^2\partial_{v^j} - \rho x^j h''_j(t)\partial_\rho,$ $D_t + D_x,\ D_x + D_u + 2\rho\ln\rho D_\rho$	$f(t)\partial_p,\ P_t,\ J_k,$ $\tilde{G}_j = h_j(t)\ c_s^2\partial_{x^j} +$ $+ h'_j(t)\ c_s^2\partial_{v^j} - \rho x^j h''_j(t)\partial_\rho,$ $D_t + D_x,\ D_x + D_u + 2\rho\ln\rho D_\rho$

4. Обсуждение результатов

Как было отмечено выше, результаты, полученные для уравнений Навье-Стокса и Эйлера, совпадают с известными (см. [Овсянников, 1978; Lloyd, 1981]). Кроме того, обнаружено, что подгруппа, появляющаяся в уравнениях Эйлера в случае политропного газа при показателе политропы, равном $\frac{5}{3}$ [Овсянников, 1981], допускается и в общем случае сжимаемого газа при произвольном уравнении состояния. В баротропном случае по понятной причине пропадают все симметрии, связанные с давлением. Появление бесконечномерных алгебр связано исключительно с бесконечной скоростью распространения сигнала. Они связаны с симметриями по давлению (сдвиг по давлению на произвольную функцию t) и не проявляются лишь в баротропных моделях. Уменьшение числа вязких уравнений (варианты I, II и III) приводит к увеличению числа групп растяжений (их дроблению).

В отличие от стандартного случая (см., например, [Olver, 1981]), где уравнения модели вязкой жидкости и уравнение теплопроводности (уравнение переноса тепла в жидкости) имеют различные группы симметрии, в общем причинно-зависимом случае и уравнения модели движущейся среды, и уравнение переноса в среде тепла имеют близкие группы симметрий.

Тип группы определяется гипотезами, принятыми относительно скорости сигнала, которые определяют наличие или отсутствие того или иного принципа относительности. Так, если c – величина переменная и является функцией события (т.е. считается функцией времени и простанственных координат), система уравнений допускает группу Лоренца, определяющую принцип относительности Эйнштейна и, как следствие, группу Пуанкаре или расширенную (за счет растяжений) группу Пуанкаре $\overline{P}(1,3)$. Если $c = const,$ принцип относительности отсутствует и допускается лишь группа Евклида (расширенная группа Евклида). Наконец, если $c = \infty$ вместо группы Лоренца допускается группа Галилея (расширенная группа Галилея), определяющая соответствующий принцип относительности Галилея. Последний результат совпадает с известным (см. [Lloyd, 1981] для системы Навье-Стокса и [Овсянников, 1978; Olver, 1986] для системы Эйлера). Легко видеть, что ни вязкость, ни (не)сжимаемость и/или (без)дивергентность поля скорости не оказывает влияния на тип допустимой группы симметрии, хотя и меняет вид отдельных инфинитезимальных операторов.

Литература

1. *Belevich M.* Causal description of non-relativistic dissipative fluid motion // Acta Mechanica. 2003. Vol. 161. Pp. 65–80.
2. *Belevich M.* On the continuity equation // J. Phys. A: Math. Theor. 2009. Vol. 42. 375502 doi:10.1088/1751-8113/42/37/375502.
3. *Lloyd S. P.* The infinitesimal group of the Navier-Stokes equations // Acta Mechanica. 1981. Vol. 38. Pp. 85–98.
4. *Овсянников Л. В.* Групповой анализ дифференциальных уравнений. – М.: Наука, 1978.
5. *Olver P.J.* Applications of Lie groups to differential equations. Springer-Verlag, 1986. (В перев. Олвер П. Приложение групп Ли к дифференциальным уравнениям. – М.: Мир, 1989.).

СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

П.П. Бескид, Т.М. Татарникова

О НЕКОТОРЫХ ПОДХОДАХ К РЕШЕНИЮ ПРОБЛЕМЫ АВТОРСКОГО ПРАВА В СЕТИ ИНТЕРНЕТ

P.P. Beskid, T.M. Tatarnikova

ABOUT SOME APPROACHES TO THE COPYRIGHT SOLUTION OF A PROBLEM IN THE INTERNET

Рассматриваются вопросы защиты авторского права на цифровой контент в глобальной сети Internet. Дается краткая характеристика существующим методам реализации защиты для разного типа контента, таким как шифрование данных, защита носителей информации, электронные ключи защиты, цифровые водяные знаки.

Ключевые слова: авторское право, цифровой контент, защита данных, шифрование данных, аппаратные средства защиты данных, цифровой водяной знак.

Questions of copyright protection to a digital content in global network Internet are considered. The short characteristic is given to existing methods of protection realization for different type of a content, such as data enciphering, protection of data carriers, electronic keys of protection, digital watermarks.

Key words: the copyright, digital content, the data protection, the data enciphering, hardware of the data protection, digital watermark.

В цифровую эру проблема защиты авторского права становится особенно актуальной. Глобальная сеть Интернет насыщена всевозможным контентом: графической, видео-, звуковой информацией. Растет пропускная способность каналов, совершенствуются потоковые технологии. Все аналоговое переводится в цифровое либо сразу производится в цифровом виде. Естественно, что у каждого произведения-творения есть свой автор-правообладатель.

В Законе об авторском праве и смежных правах, который с 01.01.2008 г. действует как ч. 4 ГК РФ, к объектам авторского права отнесены следующие.

1. Авторское право распространяется на произведения науки, литературы и искусства, являющиеся результатом творческой деятельности, независимо от назначения и достоинства произведения, а также от способа его выражения.

2. Авторское право распространяется как на обнародованные произведения, так и на необнародованные произведения, существующие в какой-либо объективной форме: письменной (рукопись, машинопись, нотная запись и так далее); устной (публичное произнесение, публичное исполнение и так далее); звуко- или видеозаписи (механической, магнитной, цифровой, оптической и так далее); изображения (рисунок, эскиз, картина, план, чертеж, кино-, теле-, видео- или фотокадр и так далее); объемно-пространственной (скульптура, модель, макет, сооружение и так далее); в других формах.

3. Часть произведения (включая его название), которая удовлетворяет требованиям пункта 1 настоящей статьи и может использоваться самостоятельно, является объектом авторского права.

В силу экономических факторов и пренебрежительного отношения к закону массовым тиражом расходятся именно пиратские копии. В сложившейся ситуации для защиты авторских прав законодательных мер явно недостаточно, поэтому авторам, разработчикам и издателям необходимо иметь представление о методах защиты своего контента.

Вопрос о применении и выборе методов защиты требуется рассматривать еще на начальной стадии разработки и создания программ или цифровых произведений. Для защиты цифрового контента применяются:

– шифрование контента и связанной с ним информации;
– защита носителей;
– маркирование информации с помощью цифрового водяного знака, цифровых меток и меток времени;
– аппаратные устройства.

Следует отметить, что надежно защитить интеллектуальную собственность может только комплексное применение различных технологий защиты на различных этапах распространения и использования продукта. Так как разработка собственной технологии защиты – дело сложное и дорогостоящее, лучше воспользоваться готовыми коммерческими решениями или обратиться за советом к специалистам, которые помогут выбрать оптимальный по стоимости и надежности вариант защиты вашего продукта.

Шифрование

Шифрование представляет собой основанный на криптографических алгоритмах способ защиты информации. Под шифрованием понимается процесс преобразования открытых данных в последовательность данных, недоступных для понимания, с помощью некоторого алгоритма (алгоритма шифрования).

При защите цифровых произведений, программ и данных методы шифрования применяются для решения следующих задач:

– обеспечение секретности и конфиденциальности передаваемой информации для предотвращения их незаконного использования;
– обеспечение целостности данных для предотвращения их изменения в процессе передачи;

– идентификация участников финансовых транзакций и пользователей электронного контента;

– применение цифровой подписи для подтверждения подлинности источника информации;

– совместное распространение цифрового контента и информации о способах его использования (цифровых прав);

– подтверждение передачи информации или предоставления услуг.

Существует множество криптографических алгоритмов, которые предоставляют такие возможности. Наиболее известными являются DES, RSA, IDEA, ГОСТ, алгоритм Эль-Гамаля.

Все алгоритмы шифрования базируются на одной из двух схем: шифрование на секретном ключе, базовая модель которой приведена на рис. 1, и шифрование на открытом ключе, базовая модель приведена на рис. 2.

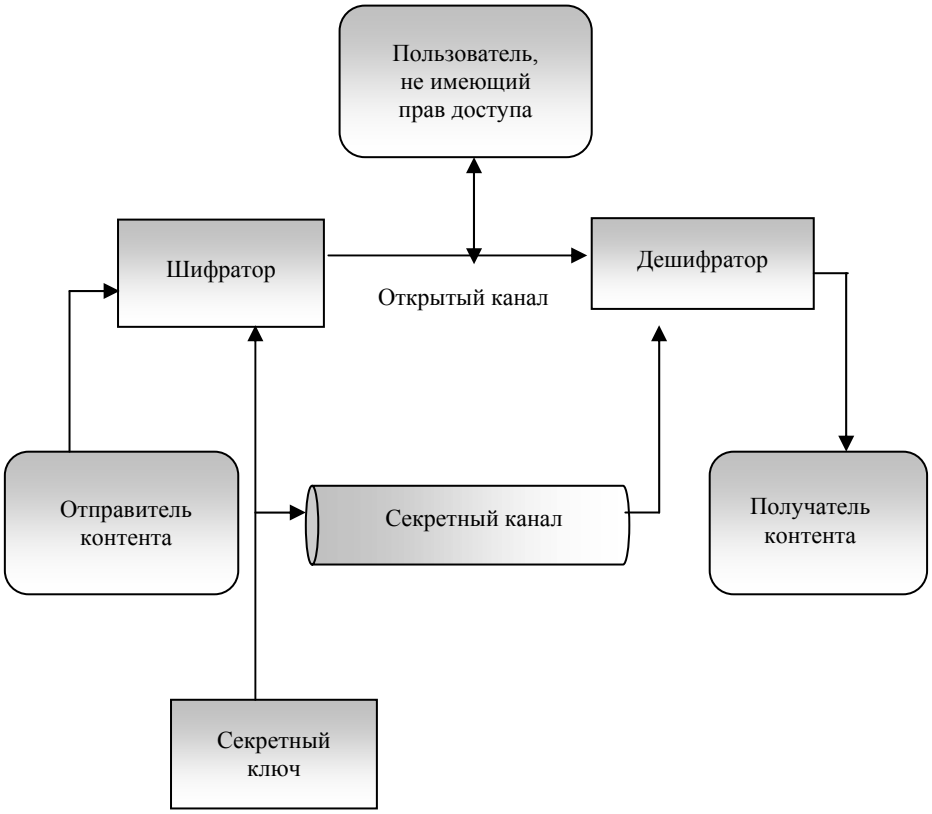


Рис. 1. Одноключевая криптосистема

Автор контента (информационного ресурса) и человек, который хочет воспользоваться этим контентом в своих целях (получить информацию из базы данных, прочесть электронную книгу, скопировать фотографию, скачать музы-

ку и т.д.) должны иметь одинаковые секретные ключи. Процессы шифрования и дешифрования являются симметричными.

В схеме на рис. 2 для шифрования и дешифрования применяются различные ключи. Для шифрования информации, предназначенной конкретному получателю, используют уникальный открытый ключ получателя-адресата.

Соответственно для дешифрования получатель использует парный секретный ключ. Для передачи открытого ключа от получателя к отправителю секретный канал не нужен. Вместо секретного канала используется аутентичный канал, гарантирующий подлинность источника передаваемой информации (открытого ключа отправителя).

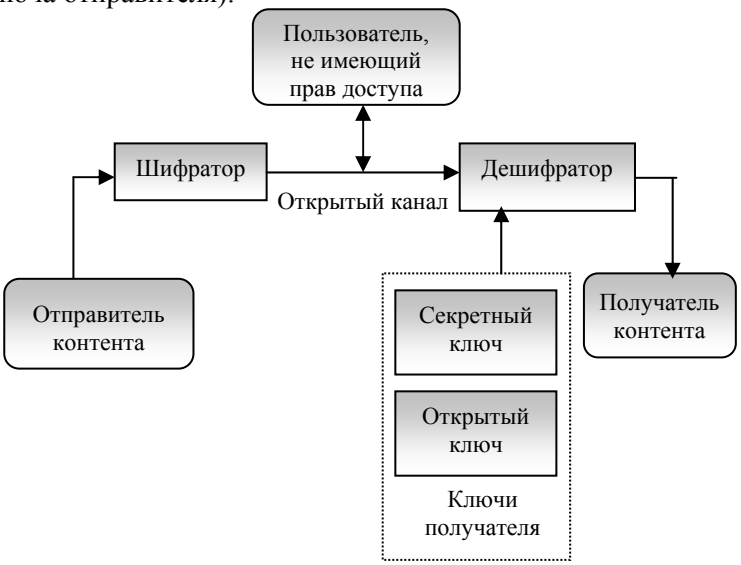


Рис. 2. Двухключевая криптосистема (шифрование/дешифрование)

Защита носителей

Защита носителей производится двумя способами, которые различаются применяемыми технологиями.

Первый способ заключается в том, что на диске участок некоторого файла повреждается аппаратным способом. В процессе работы программа проверяет наличие поврежденного файла и его параметры, после чего делается вывод о легальности копии исполняемой программы. В основном, этот способ применяя-ется для защиты программ и баз данных. Однако этот способ защиты имеет свои недостатки.

Существуют средства, которые могут копировать файлы без поврежденого участка и заменять его некоторой "вставкой". Поэтому иногда используют вариант этого метода, в котором кроме проверки поврежденного файла анализируется также и поверхность носителя на наличие физического дефекта в заданной области.

Второй способ основан на применении одного из вариантов технологии цифрового водяного знака и используется в основном для защиты компакт-дисков. В этом случае на каждый диск записывается некоторая уникальная информация, так называемый электронный отпечаток. В случае обнаружения пиратской копии компакт-диска электронный отпечаток используется для определения авторизованного диска, с которого производилось копирование.

Обычно каждый из этих способов применяется в комплексе с другими методами (шифрование, цифровая подпись и т.п.), что повышает степень защищенности программного обеспечения и цифрового контента.

Электронные ключи

Наряду с программными средствами защиты программ и данных от пиратского копирования и нелегального тиражирования применяются и средства аппаратной защиты.

Наиболее широкое применение среди разработчиков находят электронные ключи.

Электронный ключ представляет собой небольшое микроэлектронное устройство, которое подключается к одному из портов компьютера, и является аппаратным элементом системы защиты приложения.

Электронные ключи собираются на базе специально разрабатываемых для этого микросхем. В настоящее время существуют ключи двух типов:

– на базе микросхем с EEPROM-памятью (EEPROM – Electrically Erasable)

– Programmable Read-Only Memory) на основе ASIC-чипов с памятью или без памяти, которые изготавливаются "под заказ" для каждого разработчика (ASIC – Application Specific Integrated Circuit).

Более совершенные модели ключей имеют энергонезависимую память, в которой храниться служебная информация, необходимая для идентификации самого ключа, разработчика, приложения и его версии. Часть памяти электронного ключа доступна только для чтения, остальная часть доступна для чтения/записи из защищаемого приложения.

В настоящее время возможности технологии электронных ключей настолько широки, что охватывают практически весь спектр способов защиты цифрового контента. Используя электронные ключи, разработчики программ и баз данных, авторы фотографий, аудио- и видео контента могут разрабатывать надежные системы защиты своей интеллектуальной собственности.

Электронный ключ является аппаратным элементом системы защиты приложения и используется для генерации отклика после обращения к нему из программного кода приложения. Обычно применяются два варианта защиты:

– создание защитной оболочки приложения, или так называемого "конверта" (Envelope)

– создание схемы защиты с использованием вызова функций обращения к ключу.

В первом случае защищаются исполняемые файлы уже готового приложения без изменения исходного кода программы. Модуль защиты внедряется в тело программы и при запуске приложения перехватывает управление на себя. При этом он проверяет наличие электронного ключа и соответствие параметров требуемым значениям. В случае положительного ответа защищенная программа загружается, расшифровывается и ей передается управление. В противном случае загрузка и расшифровка программы не производится, и приложение заканчивает выполнение. Недостатком этого варианта защиты является однократная проверка наличия ключа только в момент запуска программы.

Во втором случае для создания системы защиты в исходном коде программмы используются вызовы функций обращения к ключу. Эти функции могут не только проверять наличие ключа, но и осуществлять операции чтения/записи в памяти ключа.

При встраивании функций обращения к ключу в код программы степень защиты приложения значительно возрастает. Однако, чем сложнее проектируемая схема защиты приложения на основе функций обращения к ключу, тем больше усилий и времени придется потратить на разработку и сопровождение программы.

Принцип действия электронных ключей таков (рис. 3).

Рис. 3. Принцип действия электронного ключа

Ключ присоединяется к определённому интерфейсу компьютера. Далее защищённая программа через специальный драйвер отправляет ему запрос, который обрабатывается в соответствии с заданным алгоритмом и возвращается обратно. Вот некоторые характерные запросы:

– проверка наличия подключения ключа;

– считывание с ключа необходимых программе данных в качестве параметра запуска;

– запрос на расшифрование данных или исполняемого кода, необходимых для работы программы (предварительно разработчик защиты шифрует часть кода программы и, понятно, непосредственное выполнение такого зашифрованного кода приводит к ошибке);

– проверка целостности исполняемого кода путём сравнения его текущей контрольной суммы с оригинальной контрольной суммой, считываемой с ключа;

– запрос к встроенным в ключ часам реального времени (при их наличии) и т.д.

Если ответ ключа правильный, то программа продолжает свою работу. В противном случае она может выполнять любые действия, заданные разработчиками – например, переключаться в демонстрационный режим, блокируя доступ к определённым функциям.

Цифровые водяные знаки (ЦВЗ)

Цифровой водяной знак представляет собой некоторую информацию, которая добавляется к цифровому контенту и может быть позднее обнаружена или извлечена для предъявления прав на этот контент. Чаще всего в качестве охраняемого контента на базе технологии ЦВЗ выступают музыкальные произведения, цифровое видео и компьютерная графика.

Теоретическим фундаментом технологии цифрового водяного знака является стеганография – раздел математики, разрабатывающий методы скрытия данных.

Обычно цифровой водяной знак используется в следующих случаях:

– для того чтобы подтвердить право собственности на цифровое произведение;

– для внедрения в каждую копию произведения электронного отпечатка;

– для защиты цифрового контента;

– для идентификации цифрового водяного знака и проверки целостности контента;

– для маркировки цифрового произведения, когда цифровой водяной знак содержит дополнительную информацию о самом произведении.

Существуют различные способы формирования цифрового водяного знака. Они различаются в зависимости от вида контента, маркетинговой политики и каналов распространения. В современных системах формирования цифровых водяных знаков используется принцип встраивания метки, являющейся узкопо-

лосным сигналом, в широком диапазоне частот маркируемого изображения, устойчивым к различным преобразованиям контейнера (атакам). Указанный метод реализуется при помощи двух различных алгоритмов и их возможных модификаций. В первом случае информация скрывается путем фазовой модуляции информационного сигнала (несущей) с псевдослучайной последовательностью чисел. Во втором – имеющийся диапазон частот делится на несколько каналов, и передача производится между этими каналами.

В общем случае типичная схема ЦВЗ выглядит следующим образом (рис. 4).

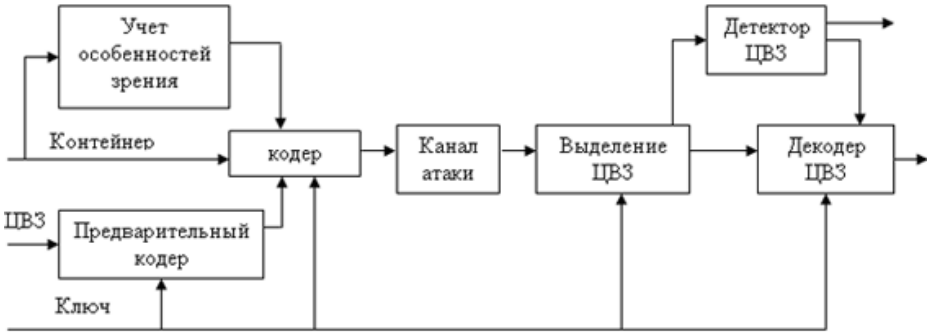


Рис. 4. Схема типичной стегосистемы

Назначение устройств стегосистемы следующее:

– прекодер – устройство, предназначенное для преобразования скрываемого сообщения к виду, удобному для встраивания в сигнал-контейнер (контейнером называется информационная последовательность, в которой прячется сообщение);

– стегокодер – устройство, предназначенное для осуществления вложения скрытого сообщения в другие данные с учетом их модели;

– устройство выделения встроенного сообщения;

– стегодетектор – устройство, предназначенное для определения наличия стегосообщения;

– декодер – устройство, восстанавливающее скрытое сообщение.

Относительно исходного изображения метка является некоторым дополнительным шумом, но так как шум в сигнале присутствует всегда, его незначительное возрастание за счет внедрения метки не дает заметных на глаз искажений. Кроме того, метка рассеивается по всему исходному изображению, в результате чего становится более устойчивой к вырезанию.

Рассмотрим для примера мультикастинговую MPEG-трансляцию. Основная сложность заключается в том, что каждый пользователь должен получать различные копии помеченных данных, с другой стороны задача данной схемы – избежать ретрансляции многочисленных копий.

Основная идея обеспечения защиты для такой трансляции состоит в том, чтобы создать два отмеченных водяными знаками потока, приписать произ-

вольную уникальную последовательность бит каждому пользователю и использовать ее, чтобы разрешить конфликт между двумя помеченными потоками. Перед изложением алгоритма следует подчеркнуть следующие моменты:

– следует использовать необратимую схему добавления цифрового водяного знака. Иначе, такая отметка видеопотока может быть легко дискредитирована;

– различные водяные знаки можно применять для каждого кадра трансляции или один и тот же знак для каждого кадра отдельного потока.

Для простоты рассмотрим второй случай. Детальная схема представлена ниже:

– создаются два потока W_1 и W_2;

– к каждому потоку по необратимой схеме добавляется собственный водяной знак;

– помечается каждый кадр синфазного канала $I_1, I_2,\ldots, I_n$;

– помечается весь видеопоток, используя по отдельности W_1 и W_2. Соответственно на выходе получая результирующие потоки $I_1 + W_0$; $I_2 + W_0$;…; $I_n + W_0$, и $I_1 + W_1$; $I_2 + W_1$; …; $I_n + W_1$;

– создается случайная последовательность бит для каждого пользователя. Длина последовательности равна количеству кадров в потоке. При живой трансляции длина такой последовательности может быть бесконечной;

– для i-го (i = 1,…, количество кадров) помеченного кадра в потоке 0 (в случае двух потоков j = 0 или 1) используется ключ K_{ij} для его кодирования. Потом мы передаем ключ K_{i0} или K_{i1} пользователю n, основываясь на последовательности бит, сгенерированной для этого пользователя. Другими словами, если i-й бит последовательности 0 передаем пользователю n ключ K_{i0}, иначе $_{Ki1}$;

– измененный ключевой заголовок для i-го кадра выглядит следующим образом: $K_{i0}k_1K_{i1}k_2K_{i1}k_3\ldots K_{i0}k_n$

– предполагая, что в i-м бите последовательности стоит 0 для пользователя 1, 1 для пользователя 2, 1 для пользователя 3,…, 0 для пользователя n;

– таким образом, i-й кадр синфазного потока, который подлежит трансляции, имеет следующую структуру: $K_{i0}k_1K_{i1}k_2K_{i1}k_3\ldots K_{i0}k_n\ I_i{+}W_0K_{i0}I_i{+}W_1K_{i1}$

Дадим несколько комментариев к такой схеме.

Во-первых, поскольку для каждого кадра используется новый ключ, то к потоку легко присоединяться и отсоединяться. Эта схема также позволяет легко приостанавливать трансляцию отдельным пользователям и возобновлять ее без перерегистрирования (чтобы исключить пользователя n достаточно не передавать ему новый ключ). Во-вторых, хотя схема не выглядит масштабируемой в соответствии с распределением ключей, она предоставляет оптимизированное решение, благодаря часто меняющимся ключам. С другой стороны, в связи с необходимостью ретранслировать ключи, она оправдана в использовании для трансляций среднего размера (не больше 1000 пользователей). Предположим, каждый ключ состоит из 128 бит или 16 байт, тогда длина ключевого

заголовка составляет 16 000 байт и сравнима с размером одного кадра синфазного потока.

Технология цифрового водяного знака используется обычно совместно с другими методами защиты цифровых произведений. В последнее время она завоевывает все более широкий рынок благодаря своей гибкости и возможности использования новых бизнес-моделей тиражирования и распространения электронного контента.

Среди популярных подходов к решению защиты контента, основанных на перечисленных методах, можно выделить следующие:

– деактивация правой кнопки заключается в отключении функции правой кнопки на большинстве типов мышей и удалении свойства "Сохранить рисунок как", лишая тем самым самого легкого пути получения авторского материала;

– трекинг и удаление – способ, который помогает предотвратить и отследить фото-пиратство, основанный на технологии "водяных знаков";

– Streaming – общепринятый способ защиты записанного видео;

– Digital Rights Management – использование шифрованной лицензии для защиты видео (равно как и другого контента) с различными уровнями защиты. Как только платеж подтвержден, пользователь может просматривать потоковое видео или загружать файл.

Password Protected Streams – парольная защита видео-контента. На фоне стандартных защищенных паролем пакетов, предлагаются также варианты с многократной проверкой авторизации и с маскировкой URL файлов, призванные обезопасить защищенные паролем видео от пиратского копирования.

Выводы

Средства защиты авторских прав среди цифровых источников информации активно развиваются. Совершенствуется и законодательство в этой области. Рынок программных средств защиты интеллектуальной собственности, распространяемой в Интернете и на других цифровых носителях, только складывается. Высоки и рыночные ожидания, хотя в настоящее время определить их трудно. Основная причина в том, что представители индустрии цифровых изображений до сих пор не сформулировали четких критериев оценки существующих коммерческих продуктов и предлагаемых решений по защите авторского права. Очевидно одно – будущее за комплексными решениями.

В настоящее время известны две основные группы методов защиты цифрового контента от атак, это сигнатурные и поведенческие методы. Сигнатурные методы описывают каждую атаку в виде специальной модели или сигнатуры, в качестве которой могут применяться: строка символов, семантическое выражение на специальном языке, формальная математическая модель др. Преимуществом данных методов является высокая точность определения факта атаки, а очевидным недостатком – невозможность обнаружения тех атак, сигнатуры которых пока не определены.

Поведенческие методы базируются не на моделях информационных атак, а на моделях штатного процесса функционирования системы. Принцип работы любого из таких методов основан на обнаружении несоответствия между текущим режимом работы и режимом работы, соответствующим штатной модели данного метода. Любое несоответствие рассматривается как информационная атака. Преимущество методов данного типа – возможность обнаружения новых атак без модификаций или обновлений параметров модели. К сожалению, создать точную модель штатного режима функционирования информационной системы очень сложно.

Одной из наиболее перспективных сигнатурных групп выявления атак являются методы, основанные на биологических моделях. Для их описания используются генетические или нейросетевые алгоритмы.

Нейросетевой метод основан на создании сети взаимосвязанных друг с другом искусственных нейронов, каждый из которых представляет собой пороговый сумматор. После создания нейросеть проходит период «обучения», в течение которого она учится распознавать определенные типы атак: на ее вход подаются данные, являющиеся признаком определённой атаки, после чего параметры нейросети настраиваются таким образом, чтобы на выходе она смогла определить тип этой атаки. Сложность данного метода состоит в том, что необходим чрезвычайно длительный процесс обучения на большом количестве примеров.

На сегодняшний день все методы, базирующиеся на биологических моделях, находятся пока в стадии исследования и широкого коммерческого применения не имеют.

Для моделирования системы обнаружения атак разработана программное обеспечение в среде визуального программирования Delphi, реализующее вероятностную нейронную сеть.

После обучения на вход системы было подано 5 ранее ей неизвестных видов атак на сетевые ресурсы. Результаты распознавания приведены в виде графиков на рис. 1.

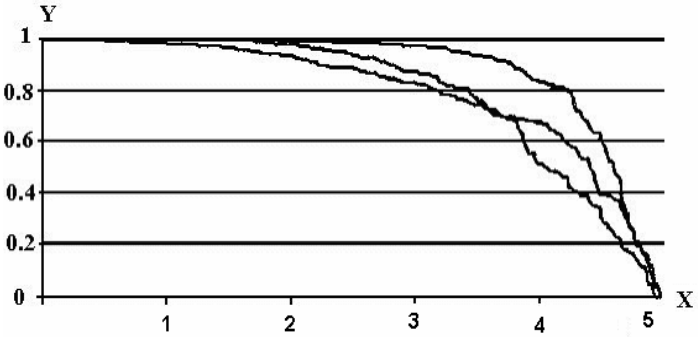


Рис. 1. Вероятность правильного отнесения обнаруженных атак к соответствующему классу атак

По оси *X* отложены номера разных новых атак (всего 5), по оси *Y* – вероятность, с которой они будут отнесены к соответствующему классу атак – на каждый класс реализуется свой метод борьбы – противодействие. Типы атак: 1 – выявление типовых атак Denial of Service; 2 – выявление атак DoS, использующих подмену IP-адреса отправителя (RFC-2827); 3 – выявление класса атак, использующих переполнение буферов; 4 – выявление класса атак, направленных на получение паролей (подбор параметров доступа имя-пароль); 5 – выявление атак уязвимостей протоколов. Для большей наглядности сообщения упорядочены по значениям вероятности. Из графика видно, что правильно классифицировано около 80 % атак на сетевые ресурсы.

Программа зарегистрирована в отраслевом фонде алгоритмов и программ, свидетельство о регистрации № 6078.

Литература

1. *Бохоров К.Ю., Шишко О.В.* Методы и политика в области сохранения произведений медиаискусства. Международной конференции «ЮНЕСКО между двумя этапами Всемирного саммита по информационному обществу» (Санкт-Петербург, Россия, 17–19 мая 2005 г.).
2. *Майстрович Т.В.* Правовые рекомендации для создателей и владельцев электронных библиотек // Рос. ассоц. электр. б-к, Некоммерч. партнерство «Электронные библиотеки»; сост. Т.В. Майстрович [и др.] / Под ред. В.Н. Монахова. – М., 2006. – 188 с.
3. *Судариков С.* Технические меры защиты авторского права и смежных прав // Интеллектуальная собственность. 2001. № 8, с. 44.

Н.М. Боголюбова

ПРОБЛЕМЫ МЕЖДУНАРОДНОГО ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОТРУДНИЧЕСТВА ВО ВНЕШНЕЙ КУЛЬТУРНОЙ ПОЛИТИКЕ РОССИИ

N.M. Bogoliubova

PROBLEMS OF THE INTERNATIONAL ECOLOGICAL COOPERATION IN EXTERNAL CULTURAL POLITICIANS OF RUSSIA

В настоящей статье автор рассматривает, какое место отводится экологическим вопросам во Внешней культурной политики России. На основе документов, материалов различных программ, показано как решаются вопросы экологии на многосторонней основе (в деятельности ЮНЕСКО), в практических мероприятиях информационно-культурных центров (на примере Совета Министров Северных Стран), в деятельности Всемирных выставок.

Ключевые слова: внешняя культурная политика, экологические проблемы, ЮНЕСКО, экологические проблемы в деятельности информационно-культурных центров, экологические проблемы в практике проведения международных выставок.

In this article the author considers the place of the environmental issues in foreign cultural policy of Russia. On the basis of documents and materials of various programs, it is shown how the issue of ecology on a multilateral basis (in UNESCO activity), the practical arrangements of information and cultural centers (for example Nordic Council of Ministers), in World exhibitions.

Keywords: Foreign cultural policy, environmental problems, UNESCO, Environmental problems in the information and cultural centers, and environmental problems in the practice of holding international exhibitions.

В современных международных отношениях все более значимую роль играют вопросы межкультурного взаимодействия. Культура является не только уникальным объединяющим средством, способным вывести политический диалог на новый уровень, создать атмосферу взаимопонимания и доверия между народами, но и самодостаточной величиной, продолжающей и расширяющей внешнеполитическую деятельность государств.

Уже начиная с XX в., в международных отношениях стал постепенно формироваться феномен внешней культурной политики, получивший развитие практически во всех странах мира. Сегодня современные государства разрабатывают документальную, договорную основу внешней культурной политики, финансируют деятельность культурных центров, проводящих инициативы связанные с ознакомлением с национальной культурой зарубежной аудитории, стремятся активно проводить диалог на многосторонней и двусторонней основе в различных направлениях и формах. Цель внешней культурной политики свя-

зана с решением весьма сложной и амбиционной задачи – формирование позитивного образа страны в международном сообществе. Для её осуществления современные государства используют самые разнообразные средства, активно прибегают к широчайшим традициям культурных контактов [1, с. 76-84].

Содержание внешней культурной политики отражает традиционные направления культурного взаимодействия в художественной, музыкальной сфере, в области науки, образования, спорта, туризма.

Настоящее сотрудничество протекает на многосторонней и двусторонней основе и связано с деятельностью разнообразных организаций. Непосредственно вопросы экологии не находят свое отражение в документах, связанных с внешней культурной политикой. Однако, обращаясь к содержанию, примерам осуществления различных инициатив межкультурного взаимодействия мы можем отметить, что проблемы экологии в международном культурном сотрудничестве сегодня играют значительную и постепенно возрастающую роль.

Так, значительное внимание в реализации Внешней культурной политики отводится такой авторитетной организации как ЮНЕСКО. Как отмечено в документе, «особое место во внешней культурной политике России занимает ЮНЕСКО как своеобразный интеллектуальный форум в системе ООН, позволяющий в неконфронтационном, деполитизированном ключе вести поиски решений глобальных проблем современности посредством развертывания сотрудничества в сферах культуры, науки и образования» [2, с. 87].

Обращаясь к проектам ЮНЕСКО, в которых принимает участие Россия, мы можем отметить, что именно экологическим проблемам в сотрудничестве с авторитетной организацией отводится первоочередное внимание.

На современном этапе Деятельность Комиссии РФ по делам ЮНЕСКО регулируется положением о Комиссии РФ по делам ЮНЕСКО, утвержденной постановлением от 12 августа 2008 г. № 598 «О внесении изменений в постановление Правительства Российской Федерации от 21 августа 1992 г.» № 609. Организационно-техническое обеспечение комиссии осуществляется Министерством иностранных дел Российской Федерации. Функции, выполняемые Комиссией РФ по делам ЮНЕСКО, указаны в 3 пункте положения о Комиссии РФ по делам ЮНЕСКО. Комиссия выполняет следующие задачи: обеспечивает в пределах своей компетенции выполнение международно-правовых обязательств, вытекающих из членства Российской Федерации в ЮНЕСКО; готовит указания для официальных делегаций Российской Федерации и представителей в органах ЮНЕСКО и оказывает им содействие в работе; распространяет информацию о ЮНЕСКО и ее программной деятельности; осуществляет сотрудничество с национальными комиссиями по делам ЮНЕСКО других государств [3].

Таким образом, очевидно, что основная функция, выполняемая Комиссией Российской Федерации по делам ЮНЕСКО – это координирование взаимодействия с ЮНЕСКО посредством обеспечения информационного обмена, привлечения кадров, решения организационных вопросов.

Более подробно о деятельности Комиссии можно судить по ее структуре. В рамках комиссии действуют одиннадцать комитетов, среди которых почти половина имеют непосредственное отношение к вопросам экологии: комитет по биоэтике, комитет всемирного (культурного и природного) наследия, Российский комитет по программе ЮНЕСКО «Человек и биосфера», Межведомственная национальная океанографическая комиссия Российской Федерации, Российский комитет Международной программы ЮНЕСКО по геонаукам [4].

При непосредственном участии комитетов ЮНЕСКО осуществляет международные программы на территории России. Одной из наиболее значимых инициатив ЮНЕСКО в сфере экологии можно назвать межправительственную программу «Человек и биосфера» (МАБ) (1971). Программа, принятая на 16-й сессии Генеральной конференции ЮНЕСКО, является продолжением Международной биологической программы. Уже в 1984 в программе участвовали около 90 стран (в том числе и СССР). Основная задача МАБ – осуществление в различных районах мира комплексных многолетних исследований воздействия человека на процессы в биосфере, а также изучение влияния изменений этих процессов на самого человека.

Сегодня программа «Человек и биосфера» (МАБ) – неотъемлемый элемент деятельности ЮНЕСКО, в области окружающей среды. Она способствует применению подходов, направленных на внедрение методов адаптивного управления экосистемами, и установлению партнерских связей между всеми участниками. Здесь поощряется комплексный подход к управлению экосистемами, особенно теми из них, которые имеют большое значение для охраны и пополнения пресноводных ресурсов, путем проведения новых экологических исследований в партнерстве с глобальным сообществом, занимающимся изменениями окружающей среды. МАБ по-прежнему укрепляет потенциал в решении проблем окружающей среды.

Самостоятельное значение в природоохранной деятельности ЮНЕСКО принадлежит вопросам популяризации объектов природного наследия, включенных в особый список, который стал формироваться ещё в конце XX в. Ведущая роль в этом вопросе принадлежит Отделу физической географии и проблем природопользования (руководитель проекта А.А. Буторин). Института Географии Российской Академии Наук. Начиная с 1996 г., сотрудники отдела являются постоянными участниками работ в рамках одной из наиболее известных инициатив ЮНЕСКО – Конвенции об охране всемирного наследия. Работа в данном направлении включает экспедиционные исследования и подготовку номинаций, обоснований всемирной ценности природных комплексов, претендующих на звание «Объекта всемирного наследия ЮНЕСКО». Кроме научной ценности, работа в рамках проекта имеет большое прикладное значение. Статус объекта всемирного наследия способствует получению целого ряда преимуществ, как в природоохранном контексте, так и в плане всесторонней поддержки территорий, включенных в Список всемирного наследия.

В период с конца XX в. до настоящего времени сотрудники отдела приняли участие в целом ряде успешных проектов, которые завершились, включением в Список всемирного наследия целого ряда российских природных объектов, среди которых «Золотые горы Алтая», «Западный Кавказ», «Куршская коса», «Центральный Сихотэ-Алинь», «Убсунурская котловина», «Остров Врангеля». В настоящее время активно ведутся работы по включению в Список и других уникальных территорий: «Плато Путорана», «Ленские столбы», «Дельта Волги», «Степи Даурии», «Заповедник Магаданский», «Зеленый пояс Фенноскандии», «Большое Васюганское болото», «Ильменский заповедник» [4].

Помимо подготовки номинаций, в отделе ведутся также работы по разработке планов управления для объектов всемирного природного наследия (ВПН), формированию перечня объектов природного наследия, рекомендуемых РФ для включения в Список всемирного наследия, оценки репрезентативности существующей сети объектов ВПН по отношению к природному разнообразию России и разработки метода выделения новых объектов ВПН.

Также в рамках проекта осуществляются обучающие и просветительские программы, проводятся конференции, семинары, рабочие встречи, в которых принимают участие специалисты зарубежных территорий ВПН.

Таким образом, взаимодействие России и ЮНЕСКО в экологической сфере способствует вовлечению в различные инициативы организации широкой аудитории, специалистов, общественности имеет большое практическое значение, а также подтверждает статус нашей страны в глазах мировой общественности как государства открытого для ведения конструктивного диалога и готового решать актуальные проблемы современных международных отношений.

Экологические проблемы находят свое продолжение во Внешней культурной политике России и на двустороннем, региональном уровне, имеют большое значение в деятельности зарубежных культурных центров. Следует отметить, что в 1990-х годах в нашей стране в соответствии с новыми политическими ориентирами, отражающими идеи открытости, интеграции России в мировое культурное пространство, стали открываться различные зарубежные информационно-культурные центры. Их деятельность нацелена на популяризацию достижений в сфере культуры, науки, образования в российской аудитории, а также осуществления взаимовыгодного диалога в различных сферах. В работе подобных организаций, которых можно без преувеличения назвать активными акторами внешней культурной политики, значительное внимание отводится и вопросам экологии [2, с. 49].

Наиболее последовательно экологические вопросы нашли свое отражение в деятельности Совета Министров Северных стран (СМСС), организации, которая является форумом межправительственного сотрудничества пяти Северных стран (Норвегия, Дания, Швеция, Исландия, Финляндия) и трех автономных территорий (Фарерские острова, Гренландия и Аландские острова) [5].

В России СМСС появился в 1994 г. (в 1995 г. был открыт её офис в Санкт-Петербурге).

Программы сотрудничества Совета Министров Северных Стран дополняют двусторонние проекты отдельных Северных стран. По традициям как минимум две Северные страны должны принимать участие в инициативах, поддерживаемых СМСС. Согласно принципам сотрудничества поддерживаются устойчивые партнерские отношения организаций Северных стран и Северо-запада России, рассчитанные на долгосрочную перспективу.

Совет Министров Северных Стран заинтересован в развитии целого ряда ключевых областей: образования, науки и инновации, включая креативные отрасли; продвижения условий для экономического сотрудничества и торговли; партнерства северного измерения, особенно партнерство северного измерения в области общественного здравоохранения и социального благосостояния; укрепление развития демократии и гражданского общества, включая сотрудничество журналистов и некоммерческих организаций.

Отдельное внимание в перспективных направлениях сотрудничества уделяется вопросам природоохранного партнерства, сотрудничеству в сфере окружающей среды, климата и энергетики, включая состояние Балтийского моря.

Совет Министров Северных Стран принимает активное участие в партнерстве Северного Измерения. Политика Северного Измерения направлена на выработку общих принципов диалога и партнерства, укрепление стабильности и социального благосостояния, развитие экономического сотрудничества, интеграции, и конкурентоспособности, устойчивого развития в Северной Европе. Особое внимание уделяется насущным вопросам региона, таким как окружающая среда, общественное здравоохранение и социальная сфера, культура и коренные народы Севера.

В рамках Северного Измерения на современном этапе успешно осуществляется инновационная программа Природоохранного партнерства Северного Измерения (ППСИ). ППСИ – это совместная инновационная программа, созданная в ответ на запросы Российской Федерации и международного сообщества согласовать усилия для решения некоторых наиболее неотложных экологических проблем Северо-Запада России.

Благодаря реализации целого ряда проектов в области водных ресурсов, сточных вод, твердых отходов, эффективности использования энергетических ресурсов и удаления ядерных отходов, ППСИ содействует улучшению состояния окружающей среды и положения населения в регионе действия программы "Северное измерение" протяженностью от Балтийского до Баренцева морей.

Партнерство ППСИ, является мощным международным механизмом для совместной работы государственных ведомств, международных финансовых организаций, частных инвесторов, российских властей и всех заинтересованных сторон в решении накопившихся в регионе природоохранных проблем. С этой целью ППСИ впервые в истории объединяет опыт работы, возможности и ресурсы Европейской Комиссии, Российской Федерации, ЕБРР, ЕИБ, СИБ и Всемирного Банка в области разработки и реализации такого значимого портфеля проектов [6].

Сотрудничество России с Северными странами можно назвать весьма продуктивным и рассчитанным на перспективу. Оно лишний раз доказывает, что проблемы экологии не имеют границ и могут быть решены только при привлечении самой широкой общественности, региональных организаций, государственных, финансовых структур и т.д. Тот факт, что данные вопросы нашли свое отражение в работе информационно-культурного центра весьма показателен и свидетельствует о том, их решение лежит в том числе и в сфере культурного сотрудничества, непосредственно связано с проблемами внешней культурной политики.

Самостоятельное значение во Внешней культурной политике России уделено выявлению направлений и форм культурного сотрудничества. Среди важнейших, в документе отмечены выставки и фестивали, значимость которых определяется, прежде всего, вовлеченностью в программу их проведения широкой общественности, различных государственных и общественных структур [2, с. 77].

Основная программа настоящих мероприятий связана с решением специфических задач. Однако в современную концепцию подобных широкомасштабных акций достаточно активно включаются вопросы, которые имеют непосредственное отношение к глобальным проблемам человечества, в том числе экологическим.

Достаточно мощными многоцелевыми акциями современной культурной, экономической, политической, международной жизни являются Всемирные выставки ЭКСПО, которые представляют успехи стран в различных сферах духовной и материальной культуры, науки, технике, промышленном производстве. Проведение выставок позволяет отметить успехи и открытия человечества и наметить пути дальнейших стремлений. Современная выставочная практика, программа мероприятий позволяет обсудить и острые проблемы человечества, возбудить интерес к их решению на международном уровне. Следует отметить, что в XXI в. все выставки ЭКСПО прошли под девизами широкой природоохранной деятельности, и именно данная тема становилась стержневой в программе представления национальных павильонов и общей широкой работе мероприятий.

Так, на Всемирной выставке в Ганновере 2000 г. в центре внимания были новаторские решения проблем, с которыми человечество столкнется в будущем. Смысл заключался не в демонстрации последних достижений науки и техники, а в том, как с помощью техники люди могут добиться гармонии с природой и не нарушать ее. Собственно, выставка так и называлась "Человек–природа–техника: возникновение нового мира". В ней приняли участие почти 200 стран и организаций. Одновременно EXPO охватила 770 проектов по всему миру. Таким образом, получилась всемирная мастерская идей для решения сложных проблем будущего [8].

Выставка 2005 г., прошедшая в Японии (Нагоя, префектура Аити) продолжила экологическую тематику. Идея выставки ЭКСПО-2005 – на основе существующего в мире опыта взаимодействия Человека и Природы создать модель глобального сообщества, позволяющую сосуществовать всему многообразию

культур и цивилизаций. Тема выставки – Мудрость Природы, отражала содержание экспозиций различных павильонов. [7]

Не стала исключением и выставка 2010 года открывшаяся в Шанхае 1 мая, которая стала крупнейшим международным и экологическим форумом. В этом году мероприятие открылось под девизом «Лучший город – лучшая жизнь». На выставке представлены новые проекты проживания в городе, в том числе с учётом безопасности экологической среды, инновационные идеи по развитию городского хозяйства. [9]

Развитие экологических проблем во внешней культурной политике не ограничивается обозначенными направлениями и формами. Оно находит свое продолжение и в сфере международного туризма, где экологическое направление является одним из наиболее перспективных. Самостоятельное значение данные проблемы приобретают в развитии международных образовательных, научных контактов в практике международных фестивалей. Данная проблема находит свое продолжение во взаимодействии различных авторитетных международных организаций.

Таким образом, краткий обзор направлений и форм внешней культурной политики не исчерпывает всего многообразия современных подходов решения экологических проблем в рамках внешней культурной политики. Однако он показал, что проблемы экологии на современном этапе являются одной из важнейших, ключевых тем международного культурного сотрудничества. Как следует из современной практики межкультурного взаимодействия, именно экологическая тема способна объединить представителей различных стран для выработки путей решения насущных задач, вывести диалог на новый уровень и добиться понимания в широкой аудитории.

Кроме того, решение экологических проблем, вовлеченность в международный диалог, способствует и решению главной задачи Внешней культурной политики – формированию позитивного образа России в международном сообществе.

Сегодня документальное оформление вопросов Внешней культурной политики представлено в концептуальном документе «Внешняя культурная политика России – год 2000». Однако, современные реалии международных отношений, активные процессы интеграции, новые вызовы и угрозы требуют переосмысления вопросов внешней политики, в том числе и в сфере межкультурного взаимодействия. В современных условиях достаточно остро поставлен вопрос обновления документальной основы международного сотрудничества России. Нам представляется актуальным и важным, чтобы в новых документах, посвященным внешним культурным связям экологическим проблемам должно быть уделено особое внимание. Уникальный потенциал культурного сотрудничества, эмоциональный, яркий язык культурных мероприятий в свою очередь может способствовать обсуждению глобальных экологических задач в самой обширной аудитории и на самом высоком уровне.

Литература

1. Внешняя культурная политика России // Дипломатический вестник, 2000. № 4, с. 76-84.
2. *Боголюбова Н., Николаева Ю.* Внешняя культурная политика России и зарубежных стран. – СПб.: изд. СПбГУ, 2008, с. 48-49.
3. Положение о комиссии Российской Федерации по делам ЮНЕСКО. http://unesco.ru/ru/?module=pages&action=view&id=28. 26.04.2010.
4. Сайт Комиссии РФ по делам ЮНЕСКО // http://unesco.ru/ru/ 01.05.2010.
5. Официальный сайт представительства Совета Министров Северных стран. http://www.norden.ru/Article.aspx?id=81&lang=ru.
6. Программа Природоохранного партнерства Северного Измерения (ППСИ). http://www.ndep.org/RUS/index.asp.
7. Официальный портал Администрации Санкт-Петербурга. http://www.kfin.gov.spb.ru/press/foto/dni_japan.
8. *Андреев В.* Архитектура в экологической упаковке. На Всемирной выставке в Ганновере гармонично сочетаются человек, природа и техника http://www.ug.ru/00.25/t47.htm.
9. 7 новостей http://www.7info.ru/index.php?kn=1274674800).

Ю.В. Николаева

ПРОБЛЕМЫ ЭКОЛОГИИ ВО ВНЕШНЕЙ И ВНУТРЕННЕЙ ПОЛИТИКЕ ФРАНЦИИ

J.V. Nikolaeva

ECOLOGY PROBLEMS IN DOMESTIC AND FOREIGN POLICY OF FRANCE

Статья посвящена вопросам экологии и устойчивого развития во внутренней и внешней политике Франции. На основе различных документов автор рассматривает специфику французского экологического законодательства Франции, а также ее экологическую деятельность в рамках международных организаций.

Ключевые слова: внутренняя политика, внешняя политика, экология, устойчивое развитие, биологическое разнообразие, Франция, ЮНЕСКО, Международная организация франкофонии, международные конференции и форумы по вопросам устойчивого развития.

The article is devoted to environmental issues and to sustainable development in domestic and foreign policy of France. On the basis of various documents, the author considers the specifics of French environmental legislation and environmental performance of France at international level.

Keywords: domestic policy, foreign policy, ecology, sustainable development, biological diversity, France, UNESCO, the International Organization of Francophonie, the international conferences and forums on sustainable development.

Проблемы экологического характера в настоящее время прочно вошли в число наиболее важных проблем планетарного масштаба, требующих неотложного решения как на уровне отдельно взятых государств, так и на международном уровне. Многие авторитетные международные организации, такие как ООН, ЮНЕСКО, Совет Европы включили вопросы экологии в свою повестку дня. Не меньшее значение занимают проблемы экологии и на уровне отдельных государств, которые все чаще относят их решение к числу национальных приоритетов.

Сейчас, когда вопросы экологической безопасности никого не оставляют безучастными, решение экологических проблем многими государствами рассматривается как способ улучшения своего имиджа и в восприятии собственных граждан, и в глазах мировой общественности. Ни для кого не секрет, что плохая экологическая обстановка в стране, невнимание властных структур к вопросам экологической безопасности могут серьезным образом ухудшить его имидж и осложнить отношения с внешнеполитическими партнерами.

Одним из наиболее интересных примеров решения экологических проблем, как на государственном, так и на международном уровне является Франция. Вопросы экологии, природоохранной деятельности, устойчивого развития здесь

включены в число приоритетов национальной политики. Об этом, в частности, заявил президент Французской Республики Николя Саркози в конце 2009 г. В своем выступлении он выделил пять приоритетных областей национальной экономики, на развитие которых в 2010 г. Франция планирует выделить 35 млрд евро. Из них «11 млрд евро пойдут на высшее образование и подготовку кадров, 8 млрд – на науку, 6,5 млрд – на развитие промышленности и малых и средних предприятий, 4,5 млрд – на цифровые технологии и 5 млрд евро – *на устойчивое развитие*». По словам главы французского государства, эти меры должны помочь Франции стать еще более сильной, еще более конкурентоспособной страной и укрепить ее международный авторитет [4].

Среди европейских стран опыт Франции обращает на себя внимание с точки зрения законодательного оформления экологической политики. Франция – одна из немногих стран, в которой существует Экологический кодекс (Code de l'environnement). Это уникальный документ, принятый 18 сентября 2000 г., в создании которого участвовали государственные деятели, представители общественности, члены природоохранных обществ и организаций, ученые. Кодекс включает семь основных частей: общие постановления, физическая среда, природные пространства, фауна и флора, предупреждение загрязнений и других видов экологической опасности, применение постановления в Заморских территориях Франции, охрана природной среды в Антарктике. Значение Кодекса состоит в том, что он устанавливает индивидуальную и коллективную ответственность в области охраны окружающей среды и является фундаментальным документом, на котором формируется экологическое законодательство и экологическая политика современной Франции.

Важным шагом на пути оформления французского законодательства в области экологии стало принятие 1 марта 2005 г. Хартии Окружающей среды (Charte de l'environnement). Инициатива появления данного документа во многом исходила от бывшего президента Франции Жака Ширака. Статья 1 Хартии провозглашает право каждого гражданина проживать «в уравновешенной окружающей среде», благоприятной для его здоровья. Юридическим новшеством Хартии стало введение понятия «экологической обязанности» для индивидуальных лиц (ст. 2–4), общественных властей (ст. 5, 6, 10) и для заинтересованных секторов, таких как образование и наука (ст. 8, 9). Хартия содержит ряд важных статей относительно необходимости экологического воспитания и формирования экологического сознания у людей всех возрастов. Положения Хартии определяют различные уровни экологической ответственности и предусматривают строгие меры к правонарушителям на основании принципа «загрязняешь – плати».

Хартия Окружающей среды послужила стимулом к дальнейшей разработке концептуальных основ экологической политики современной Франции и для модернизации экологической деятельности местных властей. В течение 2008 г. многие предприятия, общественные организации и природоохранные движения

подписали на основе Хартии Окружающей среды Хартию устойчивого развития (Charte du développement durable), где были декларированы многие важные положения, в частности, сохранение биоразнообразия, сокращение последствий парникового эффекта, улучшение энергопользования.

Говоря о специфике экологического законодательства Франции, отметим, что оно постоянно обновляется и пополняется новыми документами, принимаемыми на самом высоком уровне. Очевидно, это может означать заинтересованность государства и общества в обеспечении экологической безопасности, неудовлетворенность существующим положением вещей и стремлением к повышению эффективности природоохранной деятельности на всех уровнях. Говоря о последних по времени принятия документах, необходимо отметить, что 3 августа 2009 г. Национальным собранием и Сенатом Французской Республики был принят Программный Закон № 2009-967, так называемый «Гренелль-1 (Grenelle 1), относящийся к использованию окружающей среды. Закон определил юридические рамки государственной экологической деятельности, обозначил ее основные механизмы с учетом современных вызовов. В качестве основных проблем экологической безопасности в законе обозначены климатические изменения, сохранение биоразнообразия и окружающей среды, благоприятной для здоровья, защита природных ландшафтов. Ценность этого закона в том, что он закрепил новую модель устойчивого развития, которая основана на охране окружающей среды, уменьшении потребления энергии, воды и других природных ресурсов и согласуется с общеевропейскими документами в области экологии и устойчивого развития [9]. Этот закон разработан в соответствии с общеевропейскими нормами и законодательными актами в области экологии и устойчивого развития и отражает ее современные направления и тенденции.

В настоящее время в Сенате рассматривается еще один законопроект, имеющий отношение к национальным обязательствам по охране окружающей среды, конкретизирующий и расширяющий принципы, изложенные в законе 2009 г. Этот закон получил условное название Grenelle II. В нем, в частности, есть положения, направленные на улучшение энергоснабжения строящихся зданий, на сокращение потребления энергии предприятиями и гражданами, сохранение биоразнообразия, повышение ответственности предприятий в вопросах допустимого уровня шума и выброса отходов. Данный закон предусматривает более широкую ответственность общества и предприятий в области природоохранной деятельности.

Характеристика современного экологического законодательства Франции была бы неполной без упоминания такого важного документа как Национальная Стратегия устойчивого развития. Впервые такая стратегия была принята во Франции в 2006 г. на период 2003–2008 гг. В 2009 г. был разработан проект новой Национальной Стратегии устойчивого развития на 2009–2013 гг. (Strategie nationale du developpement durable 2009–2013). В преамбуле документа сказано, что новая Стратегия по сравнению с предыдущей версией в большей степени

согласуется с общеевропейской стратегией устойчивого развития и направлена не общеевропейский уровень решения экологических проблем. Новая Национальная Стратегия должна стать «более краткой, более стратегической и более педагогической», т.е. в ее основу должны быть положены не столько принципы наказания за неуважение к окружающей среде, сколько методы воспитания, формирующие экологическое мышление граждан.

Климатические изменения, загрязнение окружающей среды, экономический и финансовый кризис требуют внесения серьезных изменений в предшествующее экологическое законодательство. Новая Национальная Стратегия устойчивого развития учитывает эти вызовы, которые ставит перед нами наступивший XXI век. Стратегия адресована не только государственным структурам, она подчеркивает ответственность гражданского общества, местных администраций, каждого отдельного индивида за сохранение окружающей среды.

Кроме нормативных актов общего характера, во Франции существует множество законов по отдельным вопросам, например, по борьбе с загрязнением воздуха, с шумом. Как считают специалисты, французская экологическая политика основана на консервативной защите окружающей среды путем организации природоохранных территорий. Большое значение в экологическом государственном управлении отводится профилактическим мероприятиям. В стране разработаны и законодательно зафиксированы специальные формулы для расчета штрафных санкций за нанесение ущерба окружающей среде. Виновники загрязнения должны быстро и оперативно снижать свои выбросы при первом предупреждении от местных властей о сильном атмосферном загрязнении [3, с. 7].

Содержательная особенность французской экологической политики основана на социальной трактовке экологической проблемы. Специалисты выделяют три краеугольных камня национальной экологической доктрины Франции - борьба со всеми видами загрязнения окружающей среды, снижение потребления природных ресурсов, улучшение качества жизни самых широких слоев населения [2, с. 49–52]. Важно отметить, что наряду с мерами охранительного и предупредительного порядка во французском законодательстве особенно отмечена необходимость формирования экологического сознания и экологического образования населения, а также адекватное отображение в текущем законодательстве объективных потребностей охраны среды обитания в соответствии с международными и европейскими нормами.

В целом, давая оценку французскому законодательству в области экологической безопасности и устойчивого развития, необходимо отметить, что оно, на наш взгляд, является более передовым, чем, во многих других европейских странах. Так, например, ни в Германии, ни в России нет Экологического кодекса, подобного французскому, хотя в России, например, существует Лесной и Водный Кодексы. Также во многих странах отсутствуют Экологические стратегии, Хартии и другие документы такого характера. Российское экологическое законодательство на фоне разнообразных документов, принятых во Франции,

выгладит более скромно. Хотя правовая база экологическим вопросам в России также довольно обширная, но вот динамика появления новых законов и других нормативных актов в данной сфере в России не столь высока, как во Франции. Таким образом, для нашей страны пример Франции в вопросах выработки национальной экологической политики и ее нормативно-правового оформления мог бы быть весьма полезен.

Внимание Франции к вопросам экологического характера и природоохранной деятельности находит продолжение и на внешнем уровне. Растущая значимость вопросов, связанных с окружающей средой в международных отношениях привела к тому, что они были включены в сферу приоритетов внешнеполитических ведомств многих стран. Не является исключением и Франция.

Основным проводником внешнеполитической деятельности Франции в вопросах экологии является Министерство иностранных и европейских дел, которое проводит большой объем работы как самостоятельно, так и в партнерстве с Министерством по вопросам экологии, энергии, устойчивого развития и морей.

МИД реализует международные обязательства, взятые Францией, относящиеся к устойчивому развитию. На официальном сайте МИД Французской Республики сказано, что «мы берем на себя коллективную ответственность, которая состоит в том, чтобы продвигать на местном, национальном, региональном и мировом уровнях экономическое, общественное развитие и охрану природной среды как взаимозависимые и дополнительные факторы устойчивого развития». Эта деятельность выражается поддержке развивающихся стран в решении экологических проблем; защите мирового природного достояния, например, тропические леса или влажные зоны; демонстрации с помощью различных акций важности совместных действий в экологическом направлении.

Основные направления внешней политики Франции в области экологии концентрируются вокруг таких проблем как: изменения климата, морская среда, использование морей и океанов, биоразнообразие, биотехнологии, леса, воды и их очистка, опустынивание, химические продукты. Практическая деятельность МИД Франции направлена на рациональное управление и предохранение природных ресурсов, на которых основано экономическое и общественное развитие, особенно это относится к странам Юга; регулирование глобализации в пользу устойчивого развития, «гуманизация глобализации», т.е. искоренение бедности, доступ к питьевой воде и к энергии.

В рамках двусторонних отношений наибольшее внимание уделяется таким темам как здоровье, сельское хозяйство, городская среда, экологическая экономическая деятельность, вода, энергия, безопасность пищевой промышленности, биоразнообразие, тропические леса, общественная и экологическая ответственность предприятий. В последнее время особенно актуальным стал вопрос о предупреждении опасностей катастроф. Многим странам Франция оказывает помощь подготовке кадров в области управления природными ресурсами, способствует распространению информации по вопросам устойчивого развития, уча-

ствует в организации и проведении международных акций, направленных на охрану природы, формирование экологического сознания.

В составе каждого посольства или постоянного представительства Франции за рубежом есть специальный сотрудник, ответственный за вопросы экологии и окружающей среды. В его обязанности входит осуществление практической работы по всем экологическим вопросам в стране пребывания или в составе крупных международных организаций. Он представляет и защищает французские и европейские интересы по экологической проблематике, осуществляет мероприятия, знакомя общественность в стране пребывания с позицией и достижениями Франции. Он отвечает за установление контактов с участниками экологической деятельности, участвует в подготовке международных конференций, организованных в стране пребывания. Такая деятельность получила название «зеленой дипломатии» (diplomatie verte) и она, безусловно, вносит неоспоримый вклад в формирование положительного образа Франции за рубежом и повышение ее авторитета [8].

Концепция внешней политики Франции в области устойчивого развития, экологии и природоохранной деятельности во многом опирается на идею о необходимости сохранения культурного разнообразия в мире. Этот вопрос включен в число важнейших приоритетов внешней культурной политики страны. В настоящее время Франция активно позиционирует себя как защитник культурного разнообразия. Франция исходит из того, что разнообразие, прежде всего, является демонстрацией в общественном пространстве национальных, региональных, культурных, лингвистических или религиозных различий в самом широком смысле слова, подчеркивает самобытность. Понятие культурного разнообразия подразумевает уважение, в том числе, и к биологическому разнообразию, равно как уважение к материальному, нематериальному и природному наследию. Культурное и биологическое разнообразие не могут рассматриваться отдельно друг от друга. Напротив, их надо рассмотреть как элементы, одинаково важные для устойчивого развития. Французская исследовательница Изабель Дюран сравнивает роль культурного разнообразия в демократическом обществе с ролью биологического разнообразия в экосистеме. Культурному разнообразию и биологическому разнообразию угрожают одни и те же вызовы и проблемы, которые требуют скорейшего решения общими усилиями всего международного сообщества [7].

В реализации принципов своей экологической политики на международном уровне Франция активно использует методы многосторонней дипломатии и возможности, предоставляемые ей членством в авторитетных международных организациях. В настоящее время Франция предпринимает меры по продвижению нового международного договора по предотвращению изменения климата. В декабре 2008 г. в рамках конференции ООН, посвященной проблеме изменения климата, состоявшейся в Польше, прошло обсуждение вопросов, связанных с выработкой дальнейших совместных действий по предотвращению изменения

климата. По мнению представителей Франции, новый законопроект должен устанавливать более жесткие ограничения на выбросы по сравнению с Киотским протоколом. Используя трибуну ООН, Франция добивается, чтобы в течение 2008–2012 гг. промышленно развитые страны сократили объем выбросов парниковых газов на 5% от уровня 1990 года. Объем выбросов углекислого газа на человека во Франции на 30–50% ниже по сравнению с Германией и Великобританией [5].

Во Франции реализуются многие экологические программы ООН, например, Программа ООН по окружающей среде. Год 2010 был провозглашен Организацией Объединенных наций Международным Годом биологического разнообразия. Во Франции прошло множество мероприятий, приуроченных к этому событию. Министерство по делам экологии, энергии, устойчивого развития и морей разработало целый цикл образовательных акций, в которых должны принять участие крупнейшие французские музеи. Например, Музей естественной истории с 19 по 23 июня провел Праздник природы «с национальным пикником 21 мая». Такие мероприятия должны привлечь внимание самых маленьких граждан Франции к экологически проблемам, воспитывать в них любовь к живой природе и уважение окружающей среде.

Вопросы экологии, сохранения природного разнообразия включены в повестку дня другой международной организации – Международной организации Франкофонии (МОФ), в которой Франция выступает в качестве идейного вдохновителя и одного из лидеров. В своих действиях в области экологии Международная организация Франкофония исходит из двух основополагающих принципов. Во-первых, политика устойчивого развития рассматривает как часть политики солидарности; во-вторых, сохранение природного наследия и биоразнообразия рассматривается как часть политики по сохранению культурного разнообразия. Оба вектора, сохранение культурного разнообразия в мире и солидарность – фундаментальные принципы деятельности МОФ, зафиксированные в основном документе Хартии Франкофонии. Будучи членом МОФ, Франция проводит множество мероприятий, направленных на привлечение внимания общественности к проблемам окружающей среды, организует различные конференции, семинары, круглые столы, оказывает консультативную деятельность по вопросам выработки национальных стратегий устойчивого развития.

При МОФ работает Институт энергии и окружающей среды Франкофонии, созданный в 1988 г. и расположенный в Квебеке. Институт призван координировать деятельность стран-членов МОФ в вопросах экологии, охраны природы и устойчивого развития. Институт осуществляет ряд международных проектов. Среди них – Программа «Улучшать условия для выработки национальных стратегий устойчивого развития», направленная на повышение эффективности организаций, работающих в данном направлении и более эффективное распространение информации по вопросам устойчивого развития.

Франция финансирует многие международные проекты в области экологии и устойчивого развития. В этих целях в 90-х гг. по инициативе французского правительства были созданы два специализированных фонда. В 1991 г. был учрежден Фонд для Мировой Окружающей среды (Fonds pour l'Environnement Mondial). Среди учредителей фонда – правительство Франции, Всемирный банк, ООН. Фонд задумывался как инновационный инструмент финансирования общественных экологических проектов, осуществляемых в развивающихся странах и в странах с переходной экономикой в таких областях как биологическое разнообразие, международные воды, климатическое изменение, опустынивание, сокращение разрушения озонового слоя. При фонде существует научный комитет, который сотрудничают с исследовательскими обществами и организациями, занимающимися проблемами в области устойчивого развития.

За время своей работы фонд принял участие в совместном финансировании около 2000 проектов общей стоимостью в 7,3 млрд долл. Большинство проектов затрагивают проблемы биоразнообразия (804 проекта), климатические изменения (569 проектов) и акции в сфере многостороннего экологического сотрудничества (281 проект).

В 1994 г. был учрежден Французский Фонд для Мировой Окружающей среды (Fonds Français pour l'Environnement Mondial). Фонд создавался как часть политики сотрудничества и развития между Францией и развивающимися странами. Цель Фонда – финансирование экспериментальных проектов регионального масштаба, адресованных странам Африки южнее Сахары. Тематика проектов различна и включает вопросы экологии и сохранения биоразнообразия, сокращения негативных последствий парникового эффекта, повреждения земель и опустынивание, сохранения озонового слоя и др. Бюджет Фонда, обеспечиваемый из средств Французского Агентства по развитию, составил 70,2 млн евро на 2007–2010 гг.

Деятельность таких фондов, по мнению Франции, позволит эффективнее включить развивающиеся страны в выработку международной политики устойчивого развития. Использование средств фондов рассматривается французским правительством как общественная помощь нуждающимся в поддержке странам, особенно странам Африки, относящимся к так называемой Зоне Первостепенной солидарности Франции.

Франция активно участвует в различных международных конференциях и форумах, посвященных вопросам экологии и окружающей среде. В октябре 2009 г. в Угадугу состоялся 7-й Мировой Форум устойчивого развития, посвященный проблемам изменения климата. На форуме, где присутствовали руководители большинства африканских стран, обсуждались вопросы выработки общей позиции по вопросам климатических изменений, проходили заседания экспертов, в результате которых были предложены рекомендации в таких направлениях устойчивого развития как энергия, вода, сельское хозяйство, опустынивание, лес, здоровье. Францию на форуме представлял бывший президент

Республики Жак Ширак и министр по делам экологии, энергии и устойчивого развития Жан – Луи Борло. Форум в Угадугу ознаменовал собой важный этап на пути дальнейшего включения стран Африки в международную природоохранную деятельность. На форуме Франция обратилась с заявлением к индустриально развитым странам помогать странам Юга адаптироваться к результатам климатических изменений.

В марте 2010 г. в Париже по инициативе Франции и Норвегии прошла Международная конференция, посвященная большим лесным массивам. Вырубка леса и повреждение лесов в результате выбросов газа и парникового эффекта, а также из-за загрязнений воздуха промышленностью и транспортом – основные проблемы, обсуждавшиеся на конференции. Также обсуждались способы решения двух важнейших проблем наступившего тысячелетия – климатические изменения и потеря биоразнообразия. Также Франция приняла участие в Мировой Конференции по проблемам океанов, прибрежных территорий и островов, которая состоялась в мае 2010 г. в Париже. Конференция была организована совместно с ЮНЕСКО. На ней обсуждались такие вопросы как климат и океаны, утрата океанического биоразнообразия, обсуждались проблемы охраны мирового океана на международном, региональном и национальном уровня.

Внешняя политика в области экологии и устойчивого развития полностью вписывается в политику помощи в развитии, реализуемую Францией. Она соответствует трем основным требованиям: интересам самой Франции, ожиданиям партнеров Франции (особенно, из стран Юга, в борьбе против бедности и неравенства), а также вписывается в рамки международной политики. В реализации своей внешней политики в сфере экологии Франция использует все возможные инструменты – методы многосторонней и двусторонней дипломатии, участие в крупных международных форумах, международных и региональных программах. К сожалению, не представляется возможным рассмотреть все направления и формы международной деятельности Франции в области экологии, однако и эти примеры свидетельствуют о ее размахе и масштабах. Отметим, в качестве критики, что такая масштабная экологическая деятельность Франции за рубежом требует от французского правительства мер по выработке специального документа – Концепции или Стратегии внешней экологической политики Франции (какой, например, существует в области внешней культурной политики [11], в котором был бы учтен весть богатый существующий опыт по решению экологических вопросов на внешнеполитической уровне.

Литература

1. Государственное регулирование экономики: опыт пяти стран / Под ред. Н. Главацкой и др. – М., 1999, с. 39–99.
2. *Лятина Т.М.* Экологические платежи в нашей стране и за рубежом // Налоги. Инвестиции. Капитал, 2004, № 2.
3. Франция выделяет 35 млрд евро на пять приоритетов // Росбалт. Новости. 14 января 2009 г. – http://www.rosbalt.ru/2009/12/14/697165.html
4. Франция определяет экологическую политику на 2008 год / Fuel Alternative. Топливный портал: события, данные, котировки – http://www.pointcarbon.com
5. Agir ansemble. Francophonie, 2006–2009. – Paris, 2009.
6. *Durant I.* Ecologie politique et diversité culturelle// Etopia Ecologie politique et diversité culturelle. 2009. 17 juin - www.etopia.be/spip.php?article1092
7. France Diplomatie. Les actions de la France à l´international en favoue du développement durable - http://www.diplomatie.gouv.fr/fr/actions-france_830/developpement-urable_18109/les-actions-france-international-faveur-du-developpement-durable_18110/index.html
8. Loi n 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement (1).Legifrance.gouv.fr
http://www.legifrance.gouv.fr/affichTexte.do;jsessionid=?cidTexte=JORFTEXT000020949548&dateTexte=&oldAction=rechJO&categorieLien=id
9. *Nye J.* Soft Power: The Means to Success in World Politics. N.Y., 2004.
Strategie d´ action culturelle de la France a l´etranger – http:// www.senat.fr/rap/r04-091/r04-091.html

М.Г. Лазар

СОЦИАЛЬНЫЙ ИНСТИТУТ НАУКИ КАК ПРЕДМЕТ СОЦИОЛОГИИ И НАУКОВЕДЕНИЯ

M.G. Lazar

SOCIAL AND INSTITUTIONAL STATUS OF SCIENCE AS THE SUBJECT OF SOCIOLOGY AND SCIENCE OF SCIENCE

Рассматривается возрождение и развитие социологии науки с конца 50-х гг. XX в. по настоящее время как составной части социологии и науковедения, анализируется процесс и содержание институционализации науки. Раскрывается содержание понятия «социальный институт», кратко представлены основные черты науки как социальный институт: субъект науки, отношения в науке, нормы и идеалы, учреждения и другие организационные формы.

Ключевые слова: наука, научное познание, система знаний, социальный институт, институционализация, институт науки, научное сообщество, идеалы, нормы и ценности науки.

The second article concerns the development of the subject of sociology of science from late 50s of the XX century up to the present time, as well as nature and contents of the process of institutionalizing of science, so that the tendency is considered as a constituent part of sociology and science of science. The article also describes the notion of social institute, as well as the main institutional features of science – subject of science, relations in science, norms and ideals, scientific establishments and other institutional forms.

Key words: science, scientific cognition, knowledge system, social institutes, institutionalizing, institutes of science, scientific community, norms and values in science.

Институционализация социологии науки

Как явствует из статьи [16], в СССР социология науки в 50–60-е гг. появилась не на голом месте, но по идеологическим и политическим причинам, пионерские идеи и теоретические концепции, разработанные советскими учеными в 20–30-х гг., остались неосмысленными и долгое время умалчивались. Многие исследователи того периода были репрессированы, а их работы запрещены или засекречены, на них нельзя было ссылаться в своих исследованиях. В результате этого возрождение и развитие социологии науки как и всей социологии, произошло под воздействием зарубежного науковедения и социологии науки, англо-американской в первую очередь. Но решающую роль в развитии социологии науки в СССР играла, бесспорно, набирающая силы после второй мировой войны научно-техническая революция (НТР) – очевидный для всех людей и политических лидеров возрастающий вклад науки в технический прогресс, в военно-технический потенциал СССР, резкое изменение ее роли в жизни общества.

Особенностью развития социологии науки в СССР является то, что наука изучается первоначально не социологией (запрещенной до конца 50-х гг. наукой), а марксистской философией, которая в виде исторического материализма подменяла собой с 20-х гг. классическую социологию. С позиций марксистской методологии в работах 50–60-х гг. наука рассматривается как *одна из форм общественного сознания, как система теоретических знаний.* И это закономерно, так как с позиций философии науки **наука представляет собой систематизированное наличное знание,** совокупность систематизированных теоретических знаний, методов их выработки и доказательств. Поэтому в науковедческой литературе 50–60-х гг. долгие годы шел спор об определении науки, о том, включать или нет в систему науки научные учреждения, выставки, библиотеки, музеи, организацию и управление процессом выработки знаний, познавательные приборы и т.п.

Социологический взгляд на науку как на специфический социальный институт сформировался постепенно в результате острой борьбы мнений, при этом, далеко не всегда корректной. На этом фоне особую ценность получает подход акад. С.Г.Струмилина, одного из пионеров науковедения 20–30 гг., который еще в 1954 г. (в третьем номере журнала «Вопросы философии») отмечал необходимость включения в понятие «наука» *процесса выработки знаний и методов исследований*. Наука, по его мнению – это и процесс выработки знаний, и сама совокупность знаний, проверенных практикой, представляющих объективную истину. Такой подход в 50-60-е гг. встречается во многих работах, посвященных науке. Это работы М.М. Карпова (Ростов-на-Дону), Г.Н. Волкова, А.А. Зворыкина, Ж.В. Келле, Т.А. Рачкова (Москва), Г.М. Доброва (Киев), В.Н. Ельмеева и М.Я. Корнеева, И.А. Майзеля (Ленинград) и других авторов, в которых наука рассматривается также как форма социальной деятельности.

Утверждению социологического подхода к науке, понятой как форма деятельности, как процесс выработки, производства теоретических знаний, их сохранения и передачи другим поколениям, способствовал перевод на русский язык в 1956 г. книги английского историка науки Дж. Бернала «Наука в истории общества» [Бернал, 1956], международные сборники «Социология науки (М., 1965), перевод с английского языка сборника «Наука о науке» (1966), появление монографий Г.М. Доброва «Наука о науке» (Киев, 1966, 1970), Г.Н. Волкова «Социология науки» (М., 1968).

В указанных сборниках впервые публикуются и работы некоторых известных зарубежных исследователей науки (Дж. Бернала, Р. Мертона, Б. Барбера, Н. Сторера и др.). В работах Г.Н. Волкова и Г.М. Доброва используются статистические материалы и первые результаты эмпирических социологических исследований науки. Но даже во втором издании работы Г.М. Доброва (1970 г.), при анализе истории обсуждения терминов «наука о науке», «наукология», «наукознание» или «общее науковедение» [Добров Г.М., 1970, с. 13–14], не упоминается вклад рассмотренных нами в статье, в частности, роль И.А. Бори-

чевского, впервые предложившего термин «науковедение» и роль другого видного ленинградского науковеда И.А. Майзеля, также предложившего термин «науковедение» в своих ранних работах и при обсуждении этого вопроса на советско-польском симпозиуме по изучению проблем науки во Львове в 1966 г. Этот термин был принят в качестве названия этого нового направления [см. Ащеулова, 2008, с. 194], а не термин «общее науковедение», предложенный Добровым, который понимался им, скорее, как общая теория науки. По поводу «общей теории науки» следует отметить, что в духе методологии марксизма, создание общей теории науки, понятой, скорее, как единой теории науки в те годы провозглашалась. Но, как показал опыт западной философии науки 60–90-х гг., а также более чем 40-летний опыт институционального академического существования науковедения в СССР и постсоветской России, общей, а тем более, единой теории науки, создано не было. Видимо такой цели и не следует ставить в условиях признания множественности парадигм (методологий) в социологии. Вместе с тем, нет оснований сомневаться в продуктивности этого нового направления, породившего как в СССР, так и на Западе тенденцию взаимодействия методов различных научных дисциплин, подходов при изучении науки.

Особую роль в институционализации, т.е. в признании и разработке науковедения сыграла Всесоюзная научная конференция «Проблемы деятельности ученого и научных коллективов», проходившая в Ленинграде с 1969 по 1975 г. в Ленинградском Доме Ученых, организуемая С.А.Кугелем и сотрудниками его сектора социологии науки ЛО Института истории естествознания и техники АН СССР, Б.Д. Лебиным, ученым секретарем ЛО АН СССР, другими науковедами города на Неве. Указанная конференция объединила усилия и позволила ознакомиться с результатами эмпирических исследований науки представителей разных регионов СССР. Благодаря усилиям ленинградских социологов науки (в первую очередь С.А. Кугеля, Б.Д. Лебина, О.М. Волосевича и более молодых сотрудников) сборник материалов этой конференции с тем же названием, регулярно издавался, а Ленинград становится наряду с Москвой и Киевом признанным центром науковедческих исследований, проводящихся в СССР. Конференция проводилась до образования Института социально-экономических проблем (ИСЭП) Академии Наук СССР и ухода из него С.А. Кугеля. Последующие, 70–80-е гг. XX в., характеризуются выходом в свет нескольких монографий и коллективных сборников, свидетельствующих о признании (институциализации) социологии науки как вида отраслевой социологии. Имеются в виду работы И.И. Леймана (1971), в которых употребляется и детально разрабатывается само понятие «социальный институт науки», Е.З. Мирской (1971), И.А. Майзеля (1972, 1975), С.А. Кугеля (1971, 1983), М.Г. Лазара и И.И. Леймана (1978), М.Г. Лазара (1985), П.Б. Шелища (1981), А.П. Огурцова (1988), В.Ж. Келле (1989) и других авторов (см. список литературы).

Распад СССР и резкое падение финансирования науки и образования в начале 90-х гг. привели к временному затишью в исследовании проблем социоло-

гии науки, по крайней мере, в Ленинграде – Петербурге. Возвращение С.А. Кугеля в конце 80-х гг. в ЛО Института естествознания и техники РАН и образование им в этом институте сектора социологии науки, а позже – Центра социологических проблем науки по примеру Москвы, где сектор с таким же названием был образован еще в 70-е годы, ознаменовалось возобновлением активных исследований в области науковедения и социологии науки.

Новый импульс науковедческим исследованиям дало образование группой петербургских социологов и философов науки во главе с профессором С.А. Кугелем в 1992 г. Международной школы социологии науки и техники, организованной на базе Санкт-Петербургского научного центра РАН и Санкт-Петербургского Союза Ученых, образованного в 1989 г. В рамках этой уникальной школы ежегодно проводилась одна, а иногда и две сессии, а на базе выступлений ее участников на сессиях, исследователей проблем науки и техники, регулярно издается Международный ежегодник «Проблемы деятельности ученого и научных коллективов», XXVI выпуск которого выходит в 2010 г. Участниками школы в 1992 г. издается учебник «Введение в социологию науки» в двух частях. Кроме него, за эти годы вышло множество других методических материалов, сборников, книг, в которых опубликованы результаты исследований участников школы различных аспектов современной науки: состояние и изменения российской научной элиты, институциональные изменения российской науки, организация и финансирование научных исследований в переходный период и др. аспекты [см. учебник «Введение в социологию науки», 1992; журнал «Социология науки и технологии», 2010, № 1]. Есть все основания утверждать, что науковедение и социология науки в современной России активно разрабатываются, о чем свидетельствует и основание в 2009 г. и выход в свет с 2010 г. нового журнала, членом редколлегии которого является и автор этой статьи, «Социология науки и технологий», первые номера которого вышли в 2010 г.

Следует, однако, отметить, что в России, **науковедение как форма самопознания науки** представляя науку как целостное и динамически развивающееся социальное явление, **сохраняет автономное рассмотрение двух взаимосвязанных составляющих науки**: «науки как ***системы развивающегося знания***, нацеленного на объективированное, системно-структурированное и обоснованное знание о мире (предмет философии и методологии науки), а также науки как ***сферы деятельности*** специфического профессионального сообщества и ***социального института*** (предмет социологии науки)» [Киященко, Мирская, 2008, с. 7-8].

Поэтому прежде чем перейти к характеристике науки как социального института, отметим кратно некоторые черты **науки как системы знаний**.

Основная задача науки – выявить законы, в соответствии с которыми изменяются и развиваются объекты. Главная особенность научного познания – ориентация на изучение объектов, которые могут быть включены в деятельность (актуально или потенциально) и их исследование как подчиняющихся объек-

тивным законам функционирования и развития. «Цель науки заключается в том, чтобы предвидеть возможные будущие изменения объектов, в том числе и те, которые соответствовали бы будущим типам и формам практического изменения мира» [Степин, 2008, с. 23]. Как система знаний и исторически высшая форма познавательной деятельности наука вырабатывает **специальный язык**, пригодный для описания объектов, который постоянно развивается по мере проникновения науки во все новые области объективного мира. Научное исследование сегодня нуждается кроме методов познания в особой системе средств практической деятельности **(специальная научная аппаратура: измерительные инструменты, приборы и установки),** без которых немыслима как фундаментальная, так и экспериментальная наука. «Научная аппаратура и язык науки выступают как выражение уже добытых знаний, которые… становятся средством дальнейшего исследования» [там же, с. 26].

В отличие от обыденного, стихийно-эмпирического познания, результаты которого не систематизированы, а представляют собой конгломерат сведений, предписаний, рецептур деятельности и поведения, научное познание вырабатывает знания (теоретические), достоверность и истинность которых обоснованы специфическими способами. «Ими являются экспериментальный контроль и выводимость одних знаний из других, истинность которых уже доказана. В свою очередь, процедуры выводимости обеспечивают перенос истинности с одних фрагментов знания на другие, благодаря чему они становятся связанными между собой, организованными в систему » [там же, с. 26-27].

Системность и обоснованность (доказательность) научного знания и отличают их от продуктов обыденной познавательной деятельности. Научное знание – предпосылка, условие функционирования и развития науки и одновременно ее главный результат, продукт. Это знание обладает рядом особенностей, отличающих ее от продуктов материального производства, главная из которых – **новизна**. Признание научного знания в качестве таковой, как ценности науки и культуры предполагает в первую очередь наличие ее новизны. «Оценщиком» новизны является дисциплинарное научное сообщество, которое способствует превращению знания в ценность культуры, в достояние всего человечества. Но наука имеет свои границы, она не может заменить собой все формы познания мира, всей культуры. Все что ускользает из поля зрения науки, компенсируют другие формы духовного постижения мира: искусство, религия, нравственность, философия.

Наука, особенно фундаментальная, нацелена на будущее, ее цель заключается в том, чтобы предвидеть возможные будущие изменения объектов. К примеру, постановка внутринаучных проблем в физике и их решение в рамках фундаментальных теоретических исследований привели к открытию электромагнитного поля и предсказанию электромагнитных волн, к открытию законов излучения атомов при переходе электронов с одного энергетического уровня на другой и т.п. Все эти теоретические открытия заложили основу для будущих

технологий. Это означает, что главные функции науки – **познавательная и социальная –** тесно взаимосвязаны, что без развитой фундаментальной науки сегодня не может быть технологического прогресса или модернизации страны. Наука как система знаний развивается как на основании внутренней логики, так и на основании потребностей, запросов социальной практики.

Наука как социальный институт, его характеристики

Институциональный подход к обществу был разработан впервые в американской социологии, а применительно к науке он был осуществлен Р.К. Мертоном (1910–2003) в 40–60-е гг. XX в. «Р. Мертона принято считать основоположником «институциональной» социологии науки, так как главным в его концепции является развертывание представления о науке как социальном институте» [Мирская, 2008, с. 123]. В сочетании с функционалистской методологией такой подход обусловливает нормативный характер мертоновской парадигмы социологии науки, в рамках которой все исследования научной деятельности основаны на представлении о том, что функционирование науки определяется поддержанием специфической системой ценностей и норм поведения, этосом науки, о чем у нас речь будет позже. В зарубежной социологии науки, кроме Р. Мертона значительный вклад внесли такие известные историки и социологи науки, как Б. Барбер, Дж. Бернал, С. Блюме, Б. Гриффит, Х. Закерман, Р. Коллинз, С. Коул, Т. Кун, Л. Лубрано, М. Малкей, Д. Прайс, Н. Сторер, Э. Шилз и др.

В СССР до середины 80-х гг. признавать вклад Р. Мертона и других «буржуазных» социологов науки в изучение науки как социального института и тем более открыто взять на вооружение их идеи, методику, было небезопасно [см. подробнее 15 с. 64-65]. Их взгляды можно было только критиковать.

Как отмечается в одном российском исследовании конца 90-х гг. «в отечественной социологии разрабатывались общие проблемы социологии науки как социального института (В.Ж. Келле, Е.З. Мирская, И.А. Майзель, И.И. Лейман), проблемы институционализации и деинституционализации науки (С.А. Кугель, П.Б. Шелищ, А.М. Тихомирова), проблемы социального контроля и этоса в науке как социальном институте (Ю.Б. Татаринов, М.Г. Лазар, А.А. Рябов)» [Институциональные изменения 1997, с. 6]. История становления и развития социологии науки в Ленинграде – Санкт-Петербурге подробно изложена в работах Н.А. Ащеуловой [Ащеулова, 2008], в мемуарной работе С.А. Кугеля [Кугель, 2006].

Сегодня социология науки является признанной отраслью социологии, предметом которой является изучение науки как социального института, социального самочувствия ученых, отношения внутри науки, ее взаимоотношения с другими институтами общества, социальные проблемы научного познания, проблемы социальной организации исследовательской работы и другие аспекты функционирования этого института (как, например, изменения в научной элите, мобильность в науке, миграция ученых и др.).

Социальные институты (от латинского слова «institutum» – установление, устройство, учреждение) представляют собой **исторически сложившиеся устойчивые формы организации совместной деятельности людей.** Первоначально это понятие имело **узко техническое значение**, обозначающее название специализированных научных и учебных учреждений. Со временем его смысл расширился и стал охарактеризовать всякого рода упорядоченность, формализацию и стандартизацию общественных связей и отношений. Позже его смысл еще больше расширился и обозначил совокупность учреждений и организаций, норм права и по определенному кругу общественных отношений, например, институт брака, институт наследования и пр. Социологи позаимствовали это понятие у правоведов и наделили его новым содержанием. Стержнем этого понятия является совокупность норм, регулирующих определенную сферу деятельности, общественных отношений [Полтавская, 2009].

Несмотря на различные подходы в российской социологии, к понятию «социальный институт» [см. Шмерлина, 2008] мы будем исходить из следующего понимания этого понятия: **социальные институты – это относительно стабильные и интегрированные совокупности символов, верований, ценностей, норм, ролей и статусов, которые управляют целыми сферами социальной жизни: семья, религия, государство, экономика, образование, управление и др.** Их предназначение – удовлетворить важнейшие жизненные потребности групп людей, обеспечить упорядоченность, формализацию и стандартизацию общественных связей и отношений людей в обществе [см. также: Радугин, 2003, с. 150–152]. А сам процесс упорядочения, формализации и стандартизации называется **институционализацией** (или институциализацией, если берется за основу русское слово «институция»).

Процесс институционализации включает в себя ряд моментов**. Во-первых**, он призван **организовать совместную деятельность людей по удовлетворению определенных социальных потребностей.** Возникновение определенной социальной потребности и условий для его удовлетворения является первым необходимым моментом институционализации. Применительно к науке можно утверждать, что потребность в систематическом производстве новых знаний возникла вместе с развитием капитализма, примерно с XVII в. **Во-вторых,** социальный институт образуется на основе устойчивых социальных связей, взаимодействий и отношений конкретных лиц или социальных групп. В случае науки – это ученые, люди, имеющие особую подготовку и профессионально занимающиеся выработкой нового, теоретического знания, между которыми возникают специфические информационные отношения. Любой социальный институт не может быть сведен к сумме, простой совокупности этих лиц и их взаимодействий. Социальные институты носят надындивидуальный характер и как подсистемы общества обладают собственным системным качеством, т.е. они представляют собой **самостоятельные общественные образования,** имеющие собственную логику развития. Они могут быть рассмотрены как социальные

системы, имеющие устойчивую структуру, обладающих интегрированностью своих элементов и выполняющих определенные функции. Такими элементами системы выступают возникшие групповые **ценности, нормы, идеалы, а также образцы деятельности и поведения,** которые согласовывают и направляют в одно русло стремления людей. Наличие этих социокультурных элементов не обеспечивает автоматически функционирование института. Для этого необходимо, чтобы они стали достоянием внутреннего мира участников данного процесса, т.е. требуется их интернализация в процессе профессиональной и нравственной социализации личности, чтобы они воплотились в **социальных статусах и ролях**. Как мы увидим ниже, такой системой ценностей в науке являются нормы этоса ученого, идеалы научного познания и деятельности.

Наконец, важнейшим элементом институционализации является **организационное оформление** социального института, т.е. совокупность учреждений, снабженных определенными материальными средствами (в том числе – финансированием) и выполняющих определенные социальные функции. В случае науки – это университеты, академии, исследовательские учреждения и другие вспомогательные организации: научные библиотеки, выставки, музеи.

Наука как социальный институт обладает всеми этими характеристиками, которые нуждаются в подробном рассмотрении. Это задача следующих статей по социологии науки.

Соответственно, в данной статье мы будем давать лишь краткую характеристику основных черт науки как социального института с позиций социологии науки. Проводя аналогию между процессом институционализации самой социологии, описанным А.А. Радугиным в цитированной уже работе, и процессом формирования всей науки в качестве социального института, можно условно выделить внешнюю и внутреннюю институционализацию науки**,** имеющую свои проявления.

Внешняя институционализация охватывает следующие пять признаков:

1. Формирование особой социальной группы людей – ученых, занимающихся наукой профессионально, для которых выработка нового знания в рамках одной или нескольких научных дисциплин – главное занятие. Занятие наукой постепенно превращается в вид духовного производства. Ученые приобретают самосознание, переписываются друг с другом, обмениваются идеями. Если в начале ХУП в. их количество было незначительно, то к концу века и в начале следующего их влияние на общество стало ощутимым. Вспомним английское Просвещение XVII в. и французское Просвещение XVIII в., представители которых оказали огромное влияние на европейскую и мировую культуру. Этот признак может быть также обозначен как формирование научного сообщества, кадров науки.

2. Результаты своих исследований ученые начинают опубликовать вначале во взаимной переписке, а потом в журналах, альманахах, ежегодниках, в отдельных книгах. В XVII в. они появлялись нерегулярно, но с ХУШ, и особенно в XIX в. в Европе издаются регулярные научные журналы не только в области

естествознания, но и в области гуманитарных и социальных наук. На этой основе возникает **научная коммуникация,** сущность которой – обмен научной информацией.

3. Постепенно трансформируются **научные и образовательные учреждения (университеты, академии**, высшие школы в области технического образования), обеспечивающие подготовку кадров для науки и промышленности. Если в средние века университеты еще не занимались наукой и не производили научные знания, то в конце ХУIII и в начале XIX в., сначала в Германии, а потом в Америке и России возникают университеты нового, Гумбольдского типа, сочетающие образование и производство нового знания, занятие наукой [подробнее, см. Лазар, 2008]. Появляются необходимые сопутствующие организации (научные библиотеки, музеи, выставки), задача которых – сохранение и распространение знаний. Все это потребовало **финансирования** со стороны государства или обеспеченных слоев населения. В России созданная Петром 1 в 1724 Академия наук, а позже университеты содержались за счет государственной казны. В рамках учреждений между учеными возникают и иные социальные отношения: служебные, функциональные.

4. Следующий признак институционализации науки свидетельствует о росте значимости и признания науки как элемент культуры. Это введение естественнонаучных и социально-гуманитарных знаний, научных дисциплин в систему начального, среднего и высшего образования. Без этого немыслимы трансляция и преемственность научных знаний, подготовка и формирование кадров науки. Это потребовало отделения церкви от образования, процесс, который происходит активно в XVIII–X1X вв., благодаря происходившим в мире буржуазным революциям. Этот процесс, как в прошлом, так и сегодня происходит не без сопротивления церкви.

5. Рост количества ученых во всех странах и превращение науки в массовую профессию, особенно в XX в., потребовали самоорганизацию научного **сообщества**, т.е. создание кроме университетов и академий новых организационных форм объединения ученых по дисциплинарному признаку (**научных обществ, ассоциаций, союзов)**, возникших на национальном уровне, а во второй половине XX в. – и на международном. В их задачу кроме производства и распространения научных знаний входит новый элемент – обеспечение социального контроля и нравственно-профессионального самоконтроля в науке.

Внутренняя институционализация науки, проходившая одновременно с вышеописанными признаками, согласно принятой аналогии, предполагает совершенствование организационных и познавательных форм науки и отдельных дисциплин, т.е. формирование следующих трех признаков:

1) выработка надежных и эффективных **исследовательских приемов и методов** как общенаучных, так и дисциплинарных. Этот процесс шел параллельно с бурным развитием естественнонаучных дисциплин в XVIII–XIX вв., а в XIX–XX вв. – социальных и гуманитарных наук.

2) выработка **устойчивых форм разделения труда** в каждой научной дисциплине и в науке в целом. Здесь уместно упомянуть в качестве нового вида труда в науке управление научными исследованиями, выработку новых организационных форм осуществления исследований, а через них и новых форм финансирования, адекватных потребностям науки, техники и производства данного государства.

3) формирование специфических для науки познавательных **идеалов, системы ценностей и норм профессиональной этики**, обеспечивающих самоконтроль в науке. Этот процесс происходил постоянно, но более активно – во второй половине XX в. Сегодня профессионально-этические кодексы приняты большинством научных ассоциаций, обществ, союзов во всех странах, включая Россию.

Все эти признаки формировались постепенно, в разных местах и в разное время. Как самоорганизующаяся система, институт науки взаимодействует с другими социальными институтами общества: государством, экономикой, политикой, образованием, религией и другими, зависит во многом от них, но в целом в течение столетий, плоть до середины XX в. он развивался как автономное образование.

Социология науки изучает эти аспекты функционирования науки как компонент социальной системы, как особый социальный институт, имеющий специфические социальной организации. На основании вышеизложенного наука как объект изучения социологии может быть определена как **специфический социальный институт по производству, сохранению и трансляции теоретических знаний об окружающей природе, обществе и человеке, направленный на познание окружающей действительности и ее преобразование.** Соответственно, основными функциями института науки являются познавательная и социальная функции.

В сокращенном виде основные признаки социального института науки таковы:

– Субъект науки (ученые, научное сообщество), производящий новое, теоретическое знание. Занятие наукой предполагает особую подготовку людей, специфическую систему оценки уровня их квалификации на базе введения ученых степеней и званий, системы признания особого вклада в науку (медалей, премий типа Нобелевской премии) и других форм вознаграждения, включая оплату труда. Научное знание является одновременно и предпосылкой, и главным результатом научной деятельности, функционирования института науки.

– Организационные связи и отношения (служебные, функциональные, информационные). Информационные отношения составляют суть научной коммуникации, воплощенной в разных формах.

– Институциональные ценности, нормы и идеалы как способ саморегуляции и социального контроля. Ценностные ориентации науки образуют фундамент ее этоса, который должен усвоить ученый, чтобы успешно заниматься исследованиями [см. Этос науки, 2008].

– Специфические учреждения и организации, обеспечивающие координацию, организацию, планирование и финансирование научных исследований, хранение и распространение (трансляцию) знаний.

Развитие науки как социального института и системы знаний, по образному выражению известного американского социолога науки Дерека Прайса, – это путь от «малой науки» к «большой науке» XX в. В нем можно выделить три исторические этапа, связанные как с разным типом рациональности, так и с различными методологией и субъект-объектными отношениями: а) классическая наука, период формирования основных черт института науки (XVII–XIX вв., б) неклассическая наука (конец XIX – середина XX вв.; в) постнеклассическая или постакадемическая наука (вторая половина XX в. и настоящее время) [см. Степин, 2008, с. 37-45]. Относительно времени формирования науки как особого социального института с указанными признаками большинство историков и социологов науки стоят на позиции признания XVII в. в качестве решающего периода ее формирования, что не означает отрицание развитых форм научного познания в предшествующем периоде истории как Востока, так и Европы. Но только после переворота, в эпоху Возрождения в XV–XVI вв., Реформацией католической религии в Европе в XVI в., на базе научной революции XVI–XVII вв., совершенной работами А. Везалия, Н. Коперника, Дж. Бруно, Г. Галилея, Р. Декарта, Ф. Бэкона и других ученых, можно говорить о возникновении науки как системы знаний, как формы профессиональной деятельности и специфический научный институт.

В процессе развития науки проявились определенные закономерности, детально и многократно изложенные в науковедческой литературе: 1) закономерность постоянного накопления (кумуляции) знаний, чередование спокойного развития науки и научных революций; 2) закономерность непрерывного роста математизации науки, приведшей в XX в. к рождению информатики, а сегодня - к необходимости информатизации всей науки; 3) закономерность дифференциации и интеграции науки, в том числе тенденция роста взаимодействия естественных, технических и социально-гуманитарных наук; 4) закономерность экспоненциального роста количества публикаций; 5) тенденция роста, а в настоящее время, стабилизации количества людей науки, 6) закономерность ускоренного развития науки, особенно во второй половине XX в, приведшего к стиранию жестких граней между наукой и технологией, к сокращению времени между совершением научного открытия и ее внедрением в производство, практику; 7) тенденция рассредоточения науки из центра на периферию (отдельной страны и целых регионов мира). Современный период ее развития откроет возможность для новых тенденций ее развития.

Из изложенного следует важный вывод о том, что наука как система наличного знания и форма деятельности, как социальный институт представляет собой самоорганизующуюся, саморегулирующуюся и саморазвивающуюся систему, выступающую в то же время как подсистема по отношению ко всему социальному целому – обществу как саморазвивающейся открытой системы.

Литература

1. *Андреев Ю.П.* Категория «социальный институт» // Философские науки, 1984, № 1.
2. *Ащеулова Н.А.* Социология науки в Ленинграде-Санкт-Петербурге: от истоков до современности // Социология в Ленинграде-Санкт-Петербурге во второй половине XX в. Межвуз. сб., 2008. Вып. 4.
3. *Бернал Дж.* Наука в истории общества / Пер. с англ. – М.: Иностранная литература, 1956.
4. Введение в социологию науки. Ч. 1-2. – СПб., изд. СПбУЭиФ, 1992.
5. *Волков Г.М.* Социология науки. – М., 1968.
6. *Добров Г.М.* Наука о науке. 2-е изд. – Киев, 1966, 1970.
7. Институциональные изменения в российской науке: организационные и социально-психологические аспекты. – СПб.: Петрополис, 1997.
8. *Карпов М.М.* Наука и развитие общества. – М., 1961.
9. *Карпов М.М.* Основные закономерности развития естествознания. – Ростов-на-Дону, 1963.
10. *Келле В.Ж.* Наука в системе общественных отношений. – М., 1988.
11. *Киященко Л.П., Мирская Е.З.* Введение. Этос науки в эпоху перемен: философия, социология, этика // Этос науки. Коллективная монография. – М.: Академия, 2008, с.7-20.
12. *Кугель С.А.* Профессиональная мобильность в науке. – М., 1983.
13. *Кугель С.А., Никандров О.М.* Молодые инженеры. – М., 1971.
14. *Лазар М.Г.* Этика науки. Философско-социологические аспекты взаимоотношений науки и морали. – Л., 1985.
15. *Лазар М.Г.* Этика науки в СССР-России: очерк истории становления // Социологический журнал, 2010, № 1.
16. *Лазар М.Г.* Социология науки в России: 20–30 гг. XX в. // Ученые записки РГГМУ, 2010, № 12.
17. *Лазар М.Г.* Университеты, академии и развитие науки: исторические типы отношений // Ученые записки РГГМУ, 2008, № 7.
18. *Лазар М.Г., Лейман И.И.* НТР и нравственные факторы научной деятельности. – Л., 1978.
19. *Лебин Б.Д.* Подбор, подготовка и аттестация научных кадров в СССР. – М.-Л., 1966.
20. *Лейман И.И.* Наука как социальный институт. – Л., 1971.
21. *Майзель И.А.* Наука. Автоматизация. Общество. – Л., 1972.
22. *Майзель И.А.* Социология науки. – Л., 1975.
23. *Мирская Е.З.* Ученый и современная наука. – Ростов-на-Дону, 1971.
24. *Налимов В.В.* Количественные методы исследования развития науки // Вопросы философии, 1966, № 12.
25. *Огурцов А.П.* Дисциплинарная структура науки: ее генезис и обоснование. – М.: Наука, 1988.
26. *Полтавская Е.И.* О понятии «социальный институт» // Социологические исследования, 2009, № 3, с. 68-71.
27. Проблемы деятельности ученого и научных коллективов // Междунар. альманах. Вып. IX–XXVII, 1993–2009.
28. *Радугин А.А., Радугин К.А.* Социология. – М., 2003.
29. Социология науки / Под ред. М.М. Карпова, А.В. Потемкина. – Ростов-на-Дону, 1968.
30. Социология науки и технологий, 2010, № 2.
31. *Степин В.С.* Эволюция этноса науки: от классической к постнеклассической рациональности // Этос науки. – М.: Академия, 2008, с. 21-47.
32. *Шелищ П.Б.* Динамика науки. – Л., 1981.
33. Этос науки / Отв.ред. Л.П. Киященко, Е.З. Мирская. – М.: Академия, 2008.
34. *Шмерлина И.А.* Понятие «социальный институт»: анализ исследовательских подходов// Социологический журнал, 2008, № 4, с. 53-69.

ХРОНИКА

Тринадцатого октября 2010 года исполняется 75 лет со дня рождения проректора по научной работе университета В.Н. Воробьева.

Вся профессиональная деятельность Владимира Николаевича связана с гидрометеорологией и изучением окружающей природной среды.

В.Н. Воробьев после окончания в 1958 году гидрометеорологического факультета ЛВИМУ им. адмирала С.О. Макарова работал гидрологом Дальневосточной перспективной разведки, заведовал лабораторией гидрологии ЛВИМУ, работал в Арктическом и Антарктическом НИИ и в период с 1966 по 1980 год был участником полярных экспедиций, а затем начальником отдела Морских прогнозов Амдерминского УГМС. В 1967 году Воробьев В.Н. защитил кандидатскую диссертацию и ему была присвоена ученая степень кандидата географических наук.

В своей профессиональной деятельности В.Н. Воробьев проявил себя высококвалифицированным специалистом, талантливым руководителем.

С 1980 года В.Н. Воробьев продолжил свою трудовую деятельность в Российском государственном гидрометеорологическом университете в должности старшего научного сотрудника, затем руководителя научно-исследовательского сектора, а с 1991 года проректора по научной работе РГГМУ.

В этот период В.Н. Воробьев проявил себя как ученый и как организатор научно-исследовательской работы, а также как организатор подготовки высококвалифицированных кадров в области гидрометеорологии.

Успешная деятельность В. Н. Воробьева неоднократно отмечалась руководством Министерства образования и науки, Росгидромета и Санкт-Петербурга. За свою трудовую деятельность В.Н. Воробьев был награжден нагрудными знаками «Почетный работник гидрометслужбы России», «Почетный полярник ММФ», «Почетный работник РГГМУ», «За заслуги» Министерства обороны РФ, медалями «За пользу и верность» Министерства Обороны РФ, «300-лет Российскому флоту», юбилейной медалью «В память 300-летия Санкт-Петербурга». В 2007 году получил почетное звание «Заслуженный работник высшей школы Российской Федерации».

В.Н. Воробьев – известный в России и за рубежом ученый и крупный организатор вузовской науки, является академиком РАЕН. Им внесен большой

вклад в исследование изменений климата Земли, динамику океана, практическое освоение и изучение Арктики и Антарктики.

На посту проректора университета по научной работе В.Н. Воробьев осуществил перестройку научной работы университета, придав большой вес фундаментальным исследованиям и развитию инновационной деятельности, что позволило университету по всем показателям этого направления войти в число ведущих вузов России.

В.Н. Воробьев принимает активное участие в общественной и научной жизни Санкт-Петербурга. На протяжении 10 лет он является Председателем ассоциации проректоров по научной работе при Совете ректоров вузов, членом Коллегии Комитета по науке и высшей школе Администрации Санкт-Петербурга.

Под его руководством и при непосредственном участии была сформирована и успешно реализуется в настоящее время научно-техническая программа «Наука вузов – Санкт-Петербургу», которая направлена на решение наиболее актуальных для города экономических, технических, экологических, социальных задач.

В.Н. Воробьев – член Национального океанографического комитета Российской Федерации.

Он соавтор 9 фундаментальных монографий и учебников, а также более 140 научных работ, опубликованных в российских и зарубежных научных изданиях.

На основании постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологического производства», Министерством образования и науки РФ был организован конкурс об условиях предоставления и использования субсидий на реализацию комплексного проекта по созданию высокотехнологического производства.

Целью реализации комплексного проекта является создание инновационного производства на основе высокотехнологического наукоемкого синтеза гидрометеорологических продуктов высокого разрешения системы раннего предупреждения опасных явлений погоды для различных кластеров реальных секторов экономики, региональных органов МЧС, администрации и граждан г. Санкт-Петербурга

Российский государственный гидрометеорологический университет признан победителем открытого публичного конкурса совместно с закрытым акционерным обществом «Институт Радарной Метеорологии».

Список авторов

Аверкиев Александр Сергеевич, канд. геогр. наук, доц. каф. океанологии РГГМУ (812) 224-21-55
Александров Виктор Яковлевич, зав. лабор. каф. ЭФА РГГМУ (812) 444-97-74
Аль-Бухайри Осама Ахмед, аспирант каф. экологии РГГМУ
Атласкин Евгений Македонович, асп. каф. метеопрогнозов РГГМУ (812) 444-81-55
Барышников Николай Борисович, д-р. геогр. наук, зав.каф. гидрометрии
Белевич Михаил Юрьевич, канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. ГОИН (СПб отд.) (812) 328-43-50
Бескид Павел Павлович, д-р техн. наук, проф. зав. каф. морских информационных технологий РГГМУ (812) 224-30-39
Блакитная Полина Александровна, канд. физ.-мат. наук, мл. науч. сотр.
Боголюбова Наталья Михайловна, канд. истор. наук, доц. каф. Международных гуманитарных связей СПбГУ (812) 444-84-92
Бойцов Владимир Дмитриевич, д-р геогр. наук, доц, ПИНРО (8152) 47-36-65
Векшина Татьяна Викторовна, канд. техн. наук, доц. каф. гидрометрии РГГМУ (812) 444-12-35
Воробьев Владимир Николаевич, канд. геогр. наук, ст. науч. сотр., проректор РГГМУ (812) 444-02-62
Гаврилова Юлия Вячеславовна, асп. кафедры метеопрогнозов
Густоев Дмитрий Владимирович, канд. геогр. наук, доц. каф. океанологии РГГМУ (812) 224-21-55
Дикинис Александр Владиславович, к.г.н., доцент, зав.каф. ДАКЗ
Дроздов Владимир Владимирович, канд. геогр. наук, доц. каф. экологии РГГМУ (812) 444-41-36
Карлин Лев Николаевич, д-р физ.-мат. наук, проф., ректор РГГМУ
Карпова Ирма Потаповна, канд. геогр. наук, доц. каф. океанологии РГГМУ (812) 224-06-49
Карсаков Алексей Леонидович, зав. лабор. промысл. океанографии, ПИНРО (812) 47-32-80
Коваленко Виктор Васильевич, д-р. техн. наук, проф., зав. каф. гидрофизики и гидропрогнозов (812) 444-82-61
Кокорин Анатолий Михайлович, канд. физ.мат. наук, ст. науч. сотр., доц, филиал СПб института океанологии РАН
Коржиков Александр Яковлевич, канд. геогр. наук, ст. науч. сотр., отдел долгосрочных прогнозов ААНИИ
Лазар Михай Гаврилович, д-р фил. наук, проф. каф. соц.-гум. наук РГГМУ (812) 444-59-47
Лобанов Владимир Алексеевич, д-р техн. наук, проф. каф. метеорологии, климатологии и охраны атмосферы РГГМУ (812) 574-55-84
Малинин Валерий Николаевич, д-р физ.мат.наук, проф. каф. ПО и ОПВ
Махура Александр Григорьевич, канд. физ.мат.наук, научный сотрудник Датского метеорологического института
Николаева Юлия Вадимовна, канд. истор. наук, доц. каф. Международных гуманитарных связей СПбГУ (812) 444-84-92
Русин Игорь Николаевич, д-р физ.-мат. наук, проф. зав. каф. СПбГУ
Сапунов Валентин Борисович, д-р. биол.наук, ст. науч. сотр.
Смирнов Николай Павлович, д-р геогр. наук, проф., зав. каф. экологии РГГМУ (812) 224-16-59
Смышляев Сергей Павлович, д-р физ.-мат. наук, проф.каф. метеопрогнозов
Субботина Елена Сергеевна, канд. геогр.мнаук, доц. каф. гидрометрии
Татарникова Татьяна Михайловна, д-р техн. наук, доц. каф. морских информационных технологий (812) 224-30-39
Филиппенко Анна Павловна, студентка метеорологического факультета
Шадурский Антон Евгеньевич, асп. каф. метеорологии, климатологии и охраны атмосферы РГГМУ (812) 224-30-39
Шевчук Олег Игоревич, асп. каф. ПО и ОПВ

Требования к представлению и оформлению рукописей для авторов журнала

1. Материал, предлагаемый для публикации, должен являться оригинальным, неопубликованным ранее в других печатных изданиях. Объем статьи может составлять до 1,5 авторских листов (1 а.л. равен 40 тыс. знаков), в исключительных случаях по решению редколлегии – до 2 авторских листов.
2. На отдельной странице приводятся сведения об авторе (авторах) на русском и английских языках: фамилия, имя, отчество, ученая степень, должность и место работы, контактные телефоны, адрес электронной почты.
   Плата за опубликование рукописей с аспирантов не взимается.
3. Аннотация статьи объемом до 7 строк на русском и английском языках не должна содержать ссылок на разделы, формулы, рисунки, номера цитируемой литературы.
4. Список литературы должен содержать библиографические сведения обо всех публикациях, упоминаемых в статье, и не должен содержать указаний на работы, на которые в тексте нет ссылок.
5. Пронумерованный список литературы (в алфавитном порядке, сначала на русском, затем на иностранных языках) приводится в конце статьи на отдельной странице с обязательным указанием следующих данных: для книг – фамилия и инициалы автора (редактора), название книги, место издания (город), год издания; для журнальных статей – фамилия и инициалы автора, название статьи, название журнала, год издания, том, номер, выпуск, страницы (первая и последняя). Разрешается делать ссылки на электронные публикации и адреса Интернет с указанием всех данных.
6. Оформление ссылок в тексте: [Иванов, 1995]. Если при цитировании делается ссылка на конкретную цитату, формулу, теорему и т.п., следует указывать номер страницы: [Иванов, 1995, с. 23]. При наличии ссылок на несколько работ одного автора, опубликованных в одном году, рядом с годом издания указывается буква русского алфавита, показывающая порядок данного издания в списке литературы: [Иванов, 1995а, с. 23].
7. Сноски помещаются на соответствующей странице текста.
8. Таблицы и другие цифровые данные должны быть тщательно проверены и снабжены ссылками на источники. Таблицы приводятся в тексте статьи, номер и название указываются над таблицей.
9. Названия зарубежных компаний приводятся в тексте без кавычек и выделений латинскими буквами. После упоминания в тексте фамилий зарубежных ученых, руководителей компаний и т.д. на русском языке, в полукруглых скобках приводится написание имени и фамилии латинскими буквами, если за этим не следует ссылка на работу зарубежного автора.

Рекомендации по форматированию для подачи рукописи в редакционно-издательский отдел

Формат А5 (148×210) книжный.
Поля: верхнее – 1,8 см; нижнее – 2,3 см; левое – 1,8 см; правое – 1,8 см.
От края до верхнего колонтитула – 0 см, до нижнего колонтитула – 1,8 см.
Колонцифры внизу в зеркальном положении – 10, обычным шрифтом, начинать с титульного листа.
Набрать текст шрифтом Times New Roman, обычный.
Межстрочный интервал – одинарный.
Абзацный отступ – 0,75 см.
Интервал до заголовка – 24 пункта, после – 6.
Размер шрифта: основной текст – 11, таблицы – 9.
Лежачие таблицы поместить в отдельный файл на формат А5 альбомный, поля: верхнее, нижнее и правое – 1,8 см, левое – 2,3 см, шрифт – 9.
Рисунки располагать по тексту в соответствии со ссылкой.
Подрисуночную подпись набрать шрифтом – 9.
В формулах русские буквы прямые, латинские – курсивные, греческие – прямые, тригонометрические функции (sin, cos и др.) набирать прямым шрифтом.
Литература – шрифт 9.
Оглавление поместить в конце рукописи – шрифт 9.

Требования к оформлению статьи для публикации в Ученых записках

Инициалы и фамилии авторов на русском языке.
Название на русском языке.
Аннотация на русском языке.
Ключевые слова на русском языке.
Инициалы и фамилии авторов на английском языке.
Название на английском языке.
Аннотация на английском языке.
Ключевые слова на английском языке.
Формат 17×24 книжный.
Поля зеркальные: верхнее и нижнее – 2,3 см; левое и правое – 1,8 см.
От края до верхнего колонтитула и нижнего колонтитулов – 1,8 см.

Внимание!

Авторская правка в верстке – компенсационная, до пяти буквенных исправлений на странице.

Научное издание

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ
РОССИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА
№ 15

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Редакторы: И.Г. Максимова, Л.В. Ковель
Компьютерная верстка Н.И. Афанасьевой
ЛР № 020309 от 30.12.96.

Подписано в печать 01.10.10. Формат 70×100 $^{1}/_{16}$. Гарнитура Times New Roman.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Уч.-изд. л. 21,4. Усл. печ. л. 21,6. Тираж 500 экз. Заказ № 00/10.
РГГМУ, 195196, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.
Отпечатано: ЗАО «НПП «Система», 197045, Санкт-Петербург, Ушаковская наб., 17/1.

Свидетельство о регистрации ПИ № ФС2-8484 от 07 февраля 2007 г.
в Управлении Федеральной службы в сфере массовых коммуникаций
и охране культурного наследия по Северо-Западному федеральному округу
Учредитель: Российский государственный гидрометеорологический университет