Министерство образования и науки Российской Федерации

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УЧЕНЫЕ ЗАПИСКИ

РОССИЙСКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО УНИВЕРСИТЕТА

№ 14

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 № 14. Научно-теоретический журнал. – СПб.: изд. РГГМУ, 2010. – 210 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 14. – St. Petersburg: RSHU Publishers, 2010. – 210 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.А. Кузьмин, И.С. Гаврилов, Т.А. Соколова, А.Ю. Тимофеев. Расчет максимальных расходов весеннего половодья методом оптимизации интегрального поправочного коэффициента 5

В.В. Коваленко, Е.В. Гайдукова, Н.В. Викторова, В.А. Хаустов, М.Н. Громова, В.С. Девятов, Е.В. Шевнина. Влияние изменения климата на многолетний слой стока весеннего половодья рек Арктической зоны России 14

Н.Р. Грачев, М.Н. Лукина, Г.Н. Угренинов. Оценка принципиальной возможности улучшения качества морской воды у побережья Курортного района Санкт-Петербурга по завершении строительства комплекса защитных сооружений 20

В.А. Бузин, Д.В. Шилов, Н.Ю. Дьяченко, П.В. Солощук. Прогнозирование опасных ледовых явлений на реке Нева 25

П.В. Солощук. Изменение климата и ледовых условий водной системы Финский Залив–Невская Губа–река Нева в осенне-зимний период за последние 15 лет 34

Н.Б. Барышников, А.О. Пагин, М.В. Соболев. Гидрологические риски 42

Метеорология

С.В. Морозова. Физико-статистический метод прогноза экстремумов метеорологических величин 50

Х.К. Нгонголо, С.П. Смышляев. Соотношения между сезонными осадками с марта по май в Экваториальной Восточной Африке и квазидвухлетний цикл стратосферных переносов (КДЦ) 60

В.А. Лобанов, А.Е. Шадурский. Применение эмпирико-статистических методов для моделирования и анализа климатических изменений 73

В.Н. Боков. О связи атмосферной циркуляции и сейсмичности в диапазоне сезонной изменчивости 89

М.А. Моцаков, С.П. Смышляев. Модель изменчивости газового состава приземного слоя атмосферы под воздействием потоков химически активных примесей с подстилающей поверхности 101

Аль-Бухайри Осама Ахмед, Н.П. Смирнов. Многолетние изменения выпадения осадков в республике Йемен за последние 50 лет 115

А.В. Бабкин, Х.А. Ислим. Оценка периодичностей в изменениях атмосферных осадков, выпадающих на территорию Турции 126

Экология

В.А. Шелутко, Е.С. Смыжова. Динамика стока биогенных веществ по реке великая в Псковско-Чудское озеро 131

Е.А. Морозов, Д.В. Поздняков, В.И. Сычёв. Спутниковые наблюдения многолетних вариаций некоторых показателей состояния экосистемы Бискайского залива 147

Океанология

Ю.В. Малинина. К оценке возможного ущерба от потенциального повышения уровня океана в XXI столетии 162

Социально-гуманитарные науки

П.П. Бескид, В.Н. Воробьев, В.Б. Митько, Т.М. Татарникова. Инновационный подход к образовательным технологиям в области морского приборостроения 177

Е.Г. Григорьева, М.А. Трубина, А.В. Черемных. Проблемы и решения компьютерного тестирования 187

Н.В. Сомова. Особенности социально-психологической адаптации иностранных студентов в контексте копинговых стратегий поведения 199

Хроника 204

Список авторов 207

Требования к представлению и оформлению рукописей для авторов журнала 208

CONTENTS

Hydrology

V.A. Kuzmin, I.S. Gavrilov, T.A. Sokolova, A.Yu. Timofeev. Computation of the spring flood maximum discharges by using a method of optimization of an integral adjustment factor 5

V.V. Kovalenko, E.V. Gaidukova, N.V. Victorova, V.A. Khaustov, M.N. Gromova, V.S. Devyatov, E.V. Shevnina. Influence of change of a climate on a long-term layer of a flow of a spring high water of the rivers of the Arctic zone of Russia 14

N.R. Grachov, M.N. Luckina, G.N. Ugreninov. Estimation of the principle possibility of the improvement quality sea water beside seasides of the Resort region Saint Petersburg upon completion construction of the complex of the defensive buildings 20

V.A. Buzin, D.V. Shilov, N.U. Dyachenko, P.V. Soloshchuk. Forecasting of the dangerous ice phenomena for the river Neva 25

P.V. Soloshchuk. Changes in the climate and ice conditions in the gulf of Finland–the Neva bight–the Neva river water system in the autumn-winter period in the past 15 years 34

N.B. Baryshnikov, A.O. Pagin, M.V. Sobolev. Hydrological risks 42

Meteorology

S.V. Morozova. Physical-statistical method of forecasting extrema of meteorological variables 50

H.K. Ngongolo, S.P. Smyshlyaev. The relationships between the march-may seasonal rainfall in Equatorial East Africa and quasi-biennial oscillation (qbo) in the lower equtorial stratospheric zonal winds 60

V.A. Lobanov, A.E. Shadursky. Application of empiric-statistical methods for modeling and analysis of climatic changes 73

V.N. Bokov. Connection between atmospheric circulation and seismicity in a seasonal variability range 89

M.A. Motsakov, S.P. Smyshlyaev. Atmospheric boundary layer composition modeling: response to the chemical fluxes from surface 101

Al-Buhairi Osama Ahmed, N.P. Smirnov. Long-term changes in precipitation at republic Yemen over the last 50 years 115

A.V. Babkin, H.A. Esleem. Estimation of the periodicities in time series of atmospheric precipitation over the territory of Turkey 126

Ecology

V.A. Shelutko, E.S. Smyzhova. Dynamics of nutrients flow along the Velikaya river in to the Pskovsko-Chudskoe Lake 131

Eu.A. Morozov, D.V. Pozdnyakov, V.I. Sychev. Observations of multi-year spatial dynamics of biochemical variables in the bay of Biscay from space 147

Oceanology

Yu. Malinina. On estimation of possible losses caused by potential sea level rise during the 21st century 162

Social science and humanities

P.P. Beskid, V.N. Vorobyev, V.B. Mit'ko, T.M. Tatarnikova. Innovative approach to educational technologies in the field of marine instrumentation 177

E.G. Grigor'eva, M.A. Trubina, AV. Cheremnykh. The problems and the solutions of computer's testing 187

N.V. Somova. Peculiarities of social adaptation of foreign students in coping behavior strategies' content 199

Chronicle 204

ГИДРОЛОГИЯ

В.А. Кузьмин, И.С. Гаврилов, Т.А. Соколова, А.Ю. Тимофеев

РАСЧЕТ МАКСИМАЛЬНЫХ РАСХОДОВ ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ МЕТОДОМ ОПТИМИЗАЦИИ ИНТЕГРАЛЬНОГО ПОПРАВОЧНОГО КОЭФФИЦИЕНТА

V.A. Kuzmin, I.S. Gavrilov, T.A. Sokolova, A.Yu. Timofeev

COMPUTATION OF THE SPRING FLOOD MAXIMUM DISCHARGES BY USING A METHOD OF OPTIMIZATION OF AN INTEGRAL ADJUSTMENT FACTOR

Рассмотрен модифицированный метод расчета максимальных расходов весеннего половодья при отсутствии данных наблюдений, основанный на оптимизации и регионализации интегрального поправочного коэффициента. Как показали численные эксперименты, по расчету максимальных расходов малых и средних водосборов северо-запада России и бассейна Оби использование предложенного подхода позволяет значительно упростить рекомендованную Сводом Правил процедуру расчета максимальных расходов и при этом повысить ее точность.

Ключевые слова: максимальный расход, упрощение, повышение точности, автоматизированный расчет

In this paper, a modified approach to computation of the spring flood maximum discharges, if no observation data are available, is considered. The proposed approach is based on optimization and regionalization of an integral adjustment factor. As numerical experiments performed for a number of small and average catchments of the north-west Russia and Ob Basin showed, this method allows significant simplifying the computation procedure recommended by the regulatory literature and improving its accuracy.

Key words: maximum discharge, simplification, improvement of accuracy, automated computation.

Советская и российская гидрологическая школа обладает неоценимым опытом прогнозирования и расчета различных гидрологических характеристик. Несмотря на то, что многие методы были разработаны около полувека назад, часть из них не имеет альтернативы и сегодня. В качестве примера можно привести тот факт, что Гидрометцентр России выполняет прогнозирование ледовых явлений на Аляске на основе метода Шуляковского, разработанного в начале 60-х гг. прошлого столетия, причем выпускаемые прогнозы превосходят по точности более современные и высокотехнологичные американские аналоги.

Особо следует отметить и имеющийся опыт разработки методов прогнозирования и расчета стока с неизученных и слабо изученных водосборов. Объявленное Международной Ассоциацией Гидрологических Наук (International Association of Hydrological Sciences) десятилетие прогнозирования стока с неизученных водосборов (the IAHS Prediction in Ungauged Basins decade, PUB) практически не принесло сколько-нибудь значимых результатов. В то же время труды советских и российских ученых (например, [Владимиров, 1990; Горошков, 1979; Рождественский, 1974] и др.) остаются невостребованными по причине их некоторой технологической незавершенности. По мнению авторов данной статьи, более широкому международному использованию разработок этих и других ученых препятствует отсутствие удобного программного обеспечения, для создания которого необходима максимально возможная автоматизация процедур расчета или прогнозирования гидрологических характеристик. В предлагаемой работе рассмотрен пример модификации процедуры расчета максимальных расходов весеннего половодья в сторону упрощения путем сокращения числа элементов расчета.

Рассмотрим эту процедуру более подробно. Согласно Своду правил 2003 г., при отсутствии гидрометрических наблюдений в расчетном створе, расчетный максимальный расход воды весеннего половодья $Q_{p\%}$, м^3/с, заданной вероятности превышения $P_{\%}$ при наличии рек-аналогов определяют по редукционной формуле:

$$Q_{p\%} = \frac{K_0 h_{p\%} \mu A}{(A + A_1)^n} \delta\delta_1\delta_2, \qquad (1)$$

где K_0 – параметр, характеризующий дружность весеннего половодья, который рассчитывают как среднее из значений, определенных по данным нескольких рек-аналогов путем обратного пересчета; $h_{p\%}$ – расчетный слой суммарного весеннего стока, мм (без срезки грунтового питания), ежегодной вероятности превышения $P_{\%}$, который определяют в зависимости от коэффициента вариации C_v и отношения C_s/C_v, а также среднего многолетнего слоя стока h_0; μ – коэффициент, учитывающий неравенство статистических параметров кривых распределения слоев стока и максимальных расходов воды; δ, δ_1, δ_2 – коэффициенты, учитывающие влияние водохранилищ, прудов и проточных озер (δ), залесенности (δ_1) и заболоченности речных водосборов (δ_2) на максимальные расходы воды; A – площадь водосбора исследуемой реки до расчетного створа, км^2; A_1 – дополнительная площадь, учитывающая снижение интенсивности редукции модуля максимального стока с уменьшением площади водосбора, км^2; N – показатель степени редукции.

Показатель степени редукции n и параметр A_1 в формуле (1) определяют на основе зависимости $q_{\max\ p\%} = f(A)$ по данным наблюдений на изученных реках исследуемого района, где $q_{\max\ p\%}$ – модуль максимального стока.

Важно заметить, что допускается введение в формулу (1) дополнительных параметров (при наличии соответствующего обоснования), учитывающих влияние естественных и искусственных факторов на формирование максимального стока воды рек весеннего половодья.

Средний многолетний слой стока весеннего половодья h_0 следует определять по данным рек-аналогов или интерполяцией по картам, построенным для исследуемого района с учетом последних лет наблюдений. В значение среднего многолетнего слоя весеннего стока вносят поправки на учет влияния местных факторов (площадь водосбора, уклоны склонов на водосборе, озерность, залесенность, заболоченность, распаханность):

а) для рек степной зоны России и полупустынной зоны Западной Сибири с площадями водосборов менее 3000 км^2 в значения h_0 следует вводить поправки на учет площади водосбора на основе построения зависимости $h_0 = f(A)$ с учетом материалов наблюдений последних лет;

б) для малых равнинных рек с площадями водосборов менее 200 км^2 лесостепной, степной, полупустынной зон и засушливых степей поправочные коэффициенты устанавливают по зависимости $h_0 = f(J_в)$, где $J_в$ – уклон водосбора;

в) при наличии озер, расположенных на водосборе реки, поправочные коэффициенты к среднему многолетнему слою стока весеннего половодья h_0 определяют по связи слоя стока со значениями средней взвешенной озерности речных бассейнов $h_0 = f(A_{оз})$, при этом параметр $A_{оз}$, %, определяют по формуле:

$$A_{оз} = \sum_{i=1}^{n} \left(\frac{100 s_i A_i}{A^2} \right), \qquad (2)$$

где S_i – площадь зеркала озера, км^2; A_i – площадь водосбора озера, км^2; A – площадь водосбора в расчетном створе реки, км^2;

г) для водосборов с залесенностью, отличной от средней зональной (районной), поправочный коэффициент определяют по соотношению $A_л/A_{л.р}$, где $A_л$ – залесенность расчетного водосбора, %; $A_{л.р}$ – среднее районное значение залесенности, %.

Вычисление среднего районного значения залесенности водосборов выполняют как среднеарифметическое из значений залесенности, %, по ближайшим речным водосборам (водосборы с $A > 200$ км^2 − для лесной и лесостепной зон и $A > 2000$–3000 км^2 − для зон степей и полупустынь).

Коэффициент вариации слоя стока весеннего половодья принимают по рекам-аналогам или интерполяцией по картам изолиний этого параметра, построенным для исследуемого района.

Расчетные значения отношения коэффициента асимметрии к коэффициенту вариации, а также коэффициента автокорреляции между стоком смежных лет $r(1)$ следует принимать как среднее из значений, установленных по данным группы рек с наиболее продолжительными наблюдениями за рассматриваемой

гидрологической характеристикой в гидрологически однородном районе с учетом площадей водосборов и других азональных факторов.

Коэффициент δ, учитывающий снижение максимального расхода воды весеннего половодья на реках, зарегулированных проточными озерами, следует определять по формуле:

$$\sigma = 1/(1 + CA_{оз}), \quad (3)$$

где C – коэффициент, принимаемый равным 0,2 для лесной и лесостепной зон и 0,4 – для степной зоны.

При наличии в бассейне озер, расположенных вне главного русла и основных притоков, значение коэффициента δ следует принимать для $A_{оз} < 2\% - 1$; $A_{оз} > 2\% - 0{,}8$.

Коэффициент δ_1, учитывающий снижение максимальных расходов воды в залесенных бассейнах, определяют по формуле:

$$\delta_1 = \frac{\alpha}{(A_л + 1)^n}, \quad (4)$$

где n' − коэффициент редукции; устанавливают по зависимости $q_{\downarrow}\max = f(A_л)$ с учетом преобладающих на водосборе почвогрунтов; α – коэффициент, учитывающий расположение леса на водосборе (в верхней или нижней части водосбора), а также природную зону (лесная или лесостепная).

Коэффициент δ_2, учитывающий снижение максимальных расходов воды с заболоченных водосборов, определяют по формуле:

$$\delta_2 = 1 - \beta \lg(0{,}1A_б + 1), \quad (5)$$

где β − коэффициент, определяемый в зависимости от типа болот и механического состава почвогрунтов вокруг болот и заболоченных земель (со слоем торфа не менее 30 см); $A_б$ − относительная площадь болот, заболоченных лесов и лугов в бассейне реки, %.

Внутриболотные озера, рассредоточенные по водосбору и расположенные вне главного русла и основных притоков, следует включать в значение относительной площади болот.

При заболоченности менее 3 % или проточной средневзвешенной озерности более 6 % коэффициент δ_2 принимают равным единице. Для горных рек коэффициенты δ_1 и δ_2 равны единице.

Таким образом, при расчетах по этой формуле необходимо использовать 9 различных формул, 5 таблиц, 7 зависимостей и 2 карты, а также вводить около 6 поправок в зависимости от способа вычисления того или иного параметра.

Авторами данной статьи была разработана альтернативная упрощенная методика, при использовании которой требуется применять 6 формул, 6 зависимостей, 3 поправки, 3 карты, а также 2 таблицы, т. е. общее число элементов расчета уменьшилось почти в полтора раза (с 29 до 20).

Суть разработанной методики заключается в определении оптимального набора параметров K_0, δ, δ_1, δ_2 в точке, для которой исходные данные отсутст-

вуют. Произведение этих параметров получило название интегрального поправочного коэффициента *D*. Рассмотрим метод расчета максимальных расходов весеннего половодья, основанный на его оптимизации и регионализации на примере водосборов, расположенных в бассейне Оби и на северо-западе Российской Федерации.

Используя ряды наблюдений и рассчитанные по ним расходы воды заданной обеспеченностью $Q_р$ в N пунктах, методом линейной пошаговой оптимизации определено для них такое значение D, при котором рассчитанные $Q'_р$ будут наименьшим образом отличаться от полученных по ряду (табл. 1).

Таблица 1

Пример оптимизации интегрального поправочного коэффициента для р. Алей – г. Алейск

Характеристика	Обеспеченность Р, %					Среднее абсолютное отклонение
	0,01	0,1	0,3	0,5	1	
$Q_р$ (по ряду наблюдений), м^3/с	2065	1510	1266	1156	1009	
$Q_р$ (D = 0,0035), м³/с	1684	1227	1020	925	792	271
$Q_р$ (D = 0,0037), м³/с	1780	1297	1079	978	837	207
$Q_р$ (D = 0,0039), м³/с	1877	1367	1137	1030	882	142
$Q_р$ (D = 0,0041), м³/с	1973	1437	1195	1083	927	78
$Q_р$ ($D_{опт}$ = 0,0043), м³/с	2069	1507	1254	1136	973	15
$Q_р$ (D = 0,0045), м³/с	2165	1577	1312	1189	1018	51
$Q_р$ (D = 0,0047), м³/с	2262	1647	1370	1242	1063	116
$Q_р$ (D = 0,0049), м³/с	2358	1718	1429	1295	1108	180
$Q_р$ (D = 0,0051), м³/с	2454	1788	1487	1347	1153	245

В наших исследованиях были рассмотрены данные 43 гидрологических постов на реках Северо-Западного региона Европейской части Российской Федерации и 40 постов, расположенных в бассейне р. Оби. Затем были построены карты пространственного распределения интегрального поправочного коэффициента (рис. 1 и 2). Как видно из карты, представленной на рис. 1, значение интегрального параметра D плавно изменяется по всей территории. Значения параметра D плавно убывают из центра рассматриваемой территория на северо-запад и на юго-восток. Наибольшие значения наблюдаются в основном в бассейне озера Ильмень.

У некоторых водосборов происходит сгущение изолиний. Это может быть вызвано рядом причин, такими как: полная урбанизация территории, вырубка больших площадей лесов, большая степень заболоченности водосбора, распашка и многое другое. Исследование этих водосборов по площади, залесенности, заболоченности и озерности ничего не выявило.

То же самое можно сказать и о бассейне р. Оби (рис. 2). Поправочный коэффициент D, определенный по данным наблюдений на 40 постах, также распределяется в пространстве весьма плавно. Кроме того, наблюдается зональность интегрального поправочного коэффициента по широте: увеличение с востока на запад.

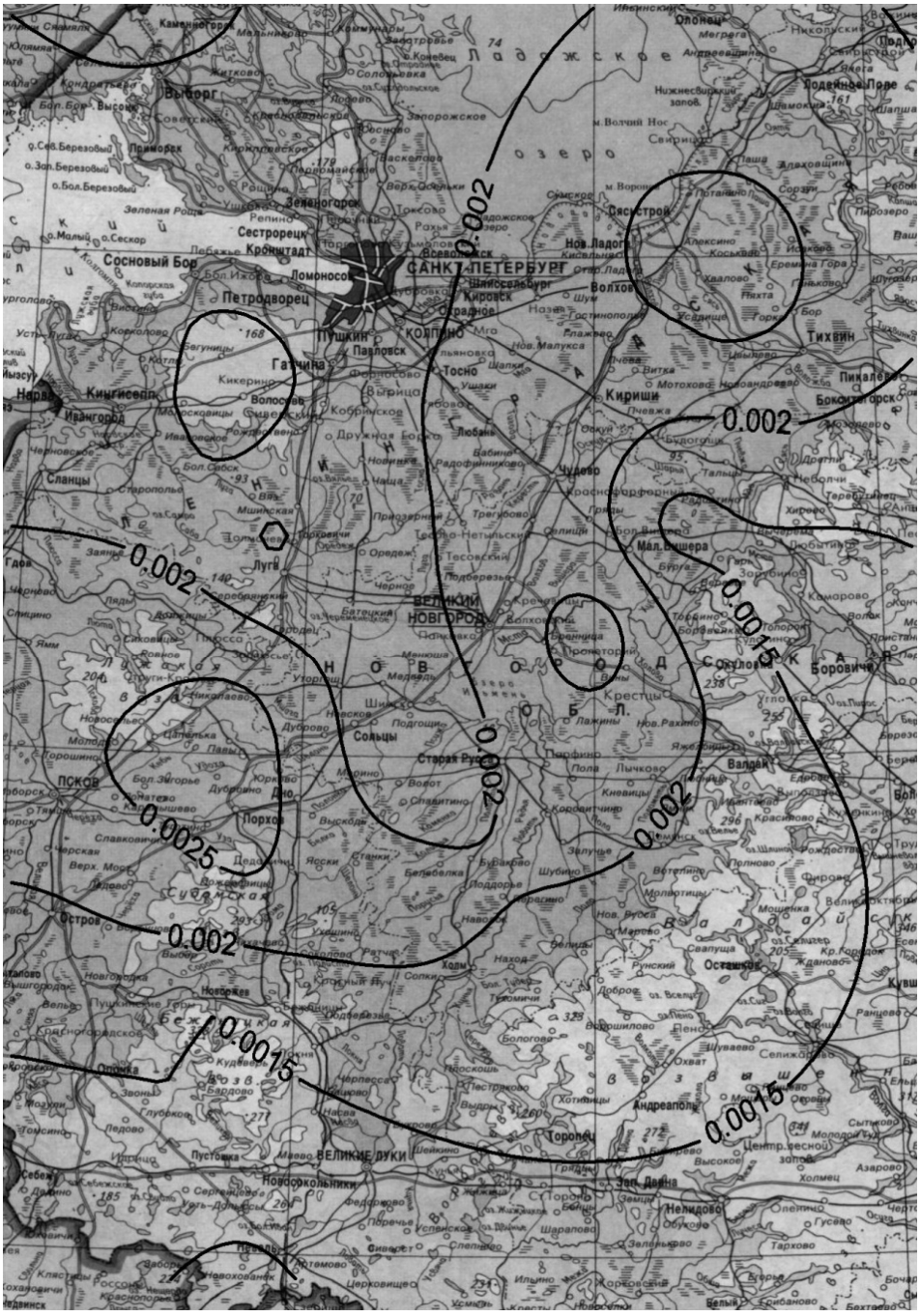


Рис. 1. Карта изолиний интегрального поправочного коэффициента *D*, определенного для малых и средних водосборов северо-запада России

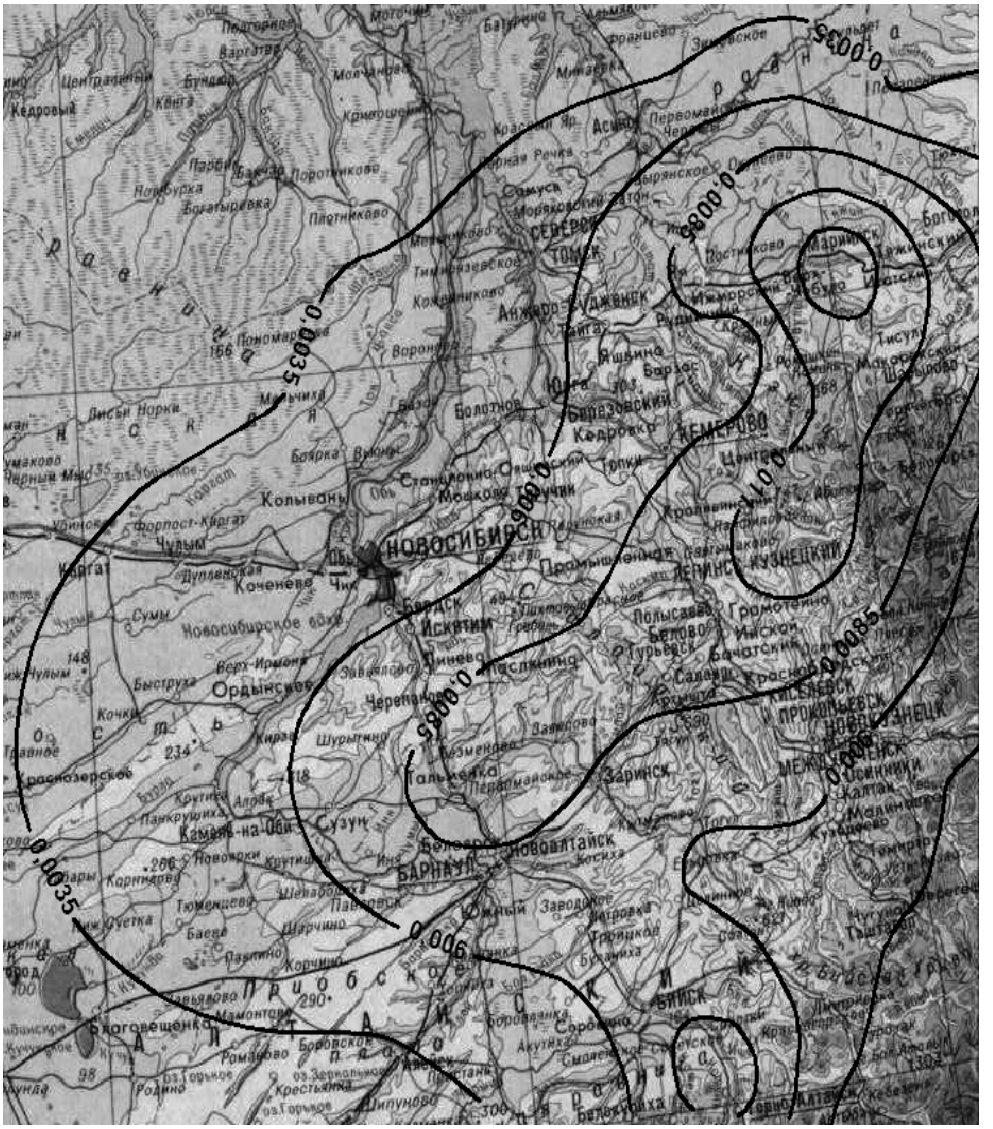


Рис. 2. Карта изолиний интегрального поправочного коэффициента *D*, определенного для малых и средних водосборов бассейна р. Оби

В верхнем участке Оби имеют место и азональные реки. Причиной азональности может служить разный характер речной сети, условия питания и формирования водного режима Оби. Также одной из возможных причин азональности может послужить влияние Алтайских гор, в которых река берет свое начало. На равнинной части бассейна Оби наблюдается равномерное и плавное распределение интегрального поправочного коэффициента.

Следовательно, значение интегрального поправочного коэффициента для неизученных водосборов можно получить с помощью интерполяции, однако необходимо учесть индивидуальные факторы стокообразования и высотное положение рассматриваемого бассейна. Роль этих факторов пока количественно не оценена, но они, безусловно, оказывают огромное воздействие на формирование водного режима рек.

Для проверки построенных карт (они представлены на рис. 1 и 2) и разработанной методики был выполнен тест. Для нескольких рек, располагающихся в исследуемом районе, четырьмя методами были рассчитаны максимальные расходы: по ряду наблюдений, по формуле Свода правил 2003 г., с использованием оптимизированного и интерполированного интегральных поправочных коэффициентов (табл. 2 и рис. 3).

Таблица 2

Сравнение максимальных расходов, полученных разными методами для р. Лебедь − пос. Усть-Лебедь

Характеристика	Обеспеченность P, %					Среднее
	0,01	0,1	0,3	0,5	1	
1. $Q_р$ (по ряду наблюдений), м^3/с	3489	2941	2673	2557	2390	2810
2. $Q_р$ (по СП 33-101-2003), м^3/с	3569	2996	2702	2564	2351	2836
Абсолютное отклонение, м^3/с	79	55	29	8	40	42
3. $Q_р$ ($D_{опт}$ = 0,0071), м^3/с	3541	2973	2681	2545	2332	2814
Абсолютное отклонение, м^3/с	52	32	8	12	58	32
4. $Q_р$ ($D_{инт}$ = 0,0070), м^3/с	3491	2931	2643	2509	2299	2775
Абсолютное отклонение, м^3/с	2	10	30	48	91	36

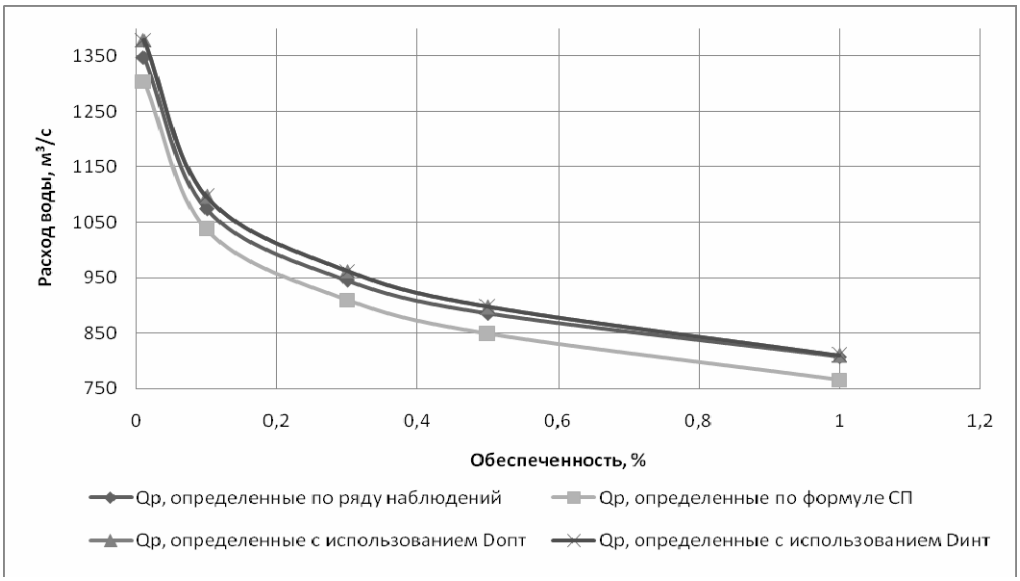


Рис. 3. Кривые обеспеченности максимальных расходов половодья $Q = f(P, \%)$
р. Улу-Юл – пос. Аргат-Юл

Анализ полученных результатов позволяет заключить, что разработанный подход не только позволяет существенно упростить процедуру расчета максимальных расходов весеннего половодья без какой бы то ни было потери точности, но и в большинстве случаев позволяет получить результаты, сопоставимые с результатами расчета при наличии данных гидрометрических наблюдений. Этот факт, в свою очередь, свидетельствует о возможности использования предложенного подхода в качестве теоретической основы программного обеспечения, которое может быть использовано для расчета максимальных расходов весеннего половодья на неизученных водосборах, и некоторых других гидрологических характеристик, определение которых может быть основано на оптимизации и регионализации интегрального поправочного коэффициента (например, в уравнении для расчета максимальных расходов воды весеннего половодья и т.п.).

Литература

1. *Владимиров А.М.* Гидрологические расчеты. – Л.: Гидрометеоиздат, 1990. – 365 с.
2. *Горошков И.Ф.* Гидрологические расчеты. – Л.: Гидрометеоиздат, 1979. – 312 с.
3. *Рождественский А.Ф., Чеботарев А.И.* Статистические методы в гидрологии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 424 с.
4. СП 33-101-2003 Определение основных гидрологических характеристик.

В.В. Коваленко, Е.В. Гайдукова, Н.В. Викторова, В.А. Хаустов, М.Н. Громова, В.С. Девятов, Е.В. Шевнина

ВЛИЯНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ КЛИМАТА НА МНОГОЛЕТНИЙ СЛОЙ СТОКА ВЕСЕННЕГО ПОЛОВОДЬЯ РЕК АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЫ РОССИИ

V.V. Kovalenko, E.V. Gaidukova, N.V. Victorova, V.A. Khaustov, M.N. Gromova, V.S. Devyatov, E.V. Shevnina

INFLUENCE OF CHANGE OF A CLIMATE ON A LONG-TERM LAYER OF A FLOW OF A SPRING HIGH WATER OF THE RIVERS OF THE ARCTIC ZONE OF RUSSIA

Рассматривается методика долгосрочного прогноза (сценарной оценки) изменения вероятностных характеристик многолетнего слоя стока весеннего половодья в арктической зоне РФ при возможном изменении климата. На примере репрезентативных водосборов рек арктической зоны России показано выявление статистически значимых изменений нормы и коэффициента вариации слоя стока весеннего половодья.

Ключевые слова: сток весеннего половодья, долгосрочный прогноз, изменение климата.

The long-term forecasting method (scenarios assessment) of the flood probabilistic characteristics is considered for the Russian Arctic region. The zones of significant changes on spring flood multiyear average and variation are shown by the example of representative arctic watersheds.

Key words: flow of a spring high water, long-term forecast, change of a climate.

Введение

Рассматривается методика долгосрочного прогноза (сценарной оценки) изменения вероятностных характеристик многолетнего слоя стока весеннего половодья в арктической зоне РФ при возможном изменении климата. Данные наблюдений за температурой воздуха показывают, что имеют место статистически значимые тренды, указывающие на потепление климата (споры ведутся, в основном, только о его причинах) [Solomon …, 2007]. В работе рассматривается также вопрос о наличия трендов начальных моментов вероятностных распределений стока весеннего половодья на реках арктической зоны. Выявление трендов статистических моментов проводится на основе критериев Стьюдента, Фишера и Колмогорова–Смирнова. Долгосрочный прогноз изменения статистических характеристик стока весеннего половодья дается по одному из вероятных климатических сценариев на примере арктической зоны Северного края России.

Исходные данные и методика исследования

В целом подобная методика была разработана [Коваленко, 1993], в ее основе лежит линейный формирующий фильтр:

$$dQ = [-(\overline{c} + \widetilde{c})Q + \overline{N} + \widetilde{N}]dt, \quad (1)$$

где Q – расход воды (слой, модуль); $c = \overline{c} + \widetilde{c} = 1/k\tau$; $N = \overline{N} + \widetilde{N} = \dot{X}/\tau$ (здесь $c = 1/k\tau$; k – коэффициент стока; τ – время релаксации бассейна; $N = \dot{X}/\tau$, $\dot{X}$ – интенсивность осадков); $\overline{N}$ и $\overline{c}$ – математические ожидания; $\widetilde{N}$ и $\widetilde{c}$ – случайные процессы типа белого шума с интенсивностями $G_{\widetilde{c}}$ и $G_{\widetilde{N}}$ и взаимной интенсивностью $G_{\widetilde{c}\widetilde{N}}$; t – время.

Уравнение (1) статистически эквивалентно уравнению Фоккера–Планка–Колмогорова (ФПК), которое описывает эволюцию распределений марковских случайных процессов (к ним относятся и процесс формирования слоя стока весеннего половодья):

$$\frac{\partial p(Q,t)}{\partial t} = -\frac{\partial\left[A(Q,t)p(Q,t)\right]}{\partial Q} + 0{,}5\frac{\partial^2\left[B(Q,t)p(Q,t)\right]}{\partial Q^2}, \quad (2)$$

где $p(Q)$ – плотность вероятности расхода воды; $A(Q, t)$, $B(Q, t)$ – коэффициенты сноса и диффузии, определяемые физико-статистическими характеристиками речных бассейнов и климатических воздействий на них.

В общем случае задание $p(Q)$ эквивалентно заданию бесконечного числа начальных моментов m_i (i = 1, 2, …), характеризующих распределение плотности вероятности. Так как на практике из-за коротких рядов наблюдений ограничиваются тремя моментами, то аппроксимируем уравнение (2) системой обыкновенных дифференциальных уравнений [Коваленко, 2007]:

$$\begin{aligned}
dm_1/dt &= -\left(\overline{c} - 0{,}5G_{\widetilde{c}}\right)m_1 - 0{,}5G_{\widetilde{c}\widetilde{N}} + \overline{N};\\
dm_2/dt &= -2\left(\overline{c} - G_{\widetilde{c}}\right)m_2 + 2\overline{N}m_1 - 3G_{\widetilde{c}\widetilde{N}}m_1 + G_{\widetilde{N}};\\
dm_3/dt &= -3\left(\overline{c} - 1{,}5G_{\widetilde{c}}\right)m_3 + 3\overline{N}m_2 - 7{,}5G_{\widetilde{c}\widetilde{N}}m_2 + 3G_{\widetilde{N}}m_1.
\end{aligned} \quad (3)$$

Трех моментов достаточно, чтобы с помощью системы (3) моделировать или прогнозировать эволюцию трех расчетных характеристик [нормы стока m_1, коэффициентов вариации $C_v(m_1, m_2)$ и асимметрии $C_s(m_1, m_2, m_3)$], используемых для изучения максимального стока весеннего половодья. Для параметризации модели используются карты приложения к СНиПу 2.01.14-83 [СНиП 2.01.14-82, 1985], на которых представлены значения расчетных гидрологических характеристик. Для выявления наличия трендов начальных моментов распределений использовалась методика скользящих 20-леток, описанная в [Пространственно временные колебания…, 1988]. Рассчитанные слои стока сравнивались с опубликованными в изданиях ГВК (основные гидрологические характеристики и многолетние данные о ресурсах поверхностных вод).

Параметризация проводится обратным пересчетом по системе (3) при $dm_i/dt = 0$, т. е. для условий квазистационарного статистического гидрологического режима для которого справедливы карты m_1 и C_v. За последнее десятиле-

тие были предложены различные варианты параметризации и усложнения системы (3) [Коваленко, 2009], однако, в данной работе применен один из наиболее практических методов, основанный на допущении, что время релаксации речных бассейнов равно одному году. Это подтверждается характером автокорреляционных функций для подавляющего числа бассейнов, площадь которых соответствует квазигоризонтальному участку редукционных зависимостей и действует механизм зонального формирования стока. Асимметрию распределения (связанную с третьим моментом и взаимной интенсивностью шумов) можно «навязать», применив фиксированное соотношение C_s/C_v. Практически это означает, что при решении прямой задачи сначала из (3) находят m_1 и m_2 (при $G_{\tilde{c}} \approx 0$, $G_{\tilde{c}\tilde{N}} = 0$), а затем, зная $C_v(m_1, m_2)$ и расчетное соотношение C_s/C_v определяют коэффициент асимметрии. С точки зрения параметризации эти функции позволяют легко вычислять $\bar{c} = 1/k$, $\overline{N} = \overline{\dot{X}}$ (так как τ = 1) и $G_{\tilde{N}}$ из второго уравнения системы (3) при известных из карт значениях C_v и m_1 (следовательно, и m_2). (Корни подобного, заведомо упрощенного, подхода к параметризации находятся в боязни натолкнуться на неустойчивость решения системы (3): при $\bar{c} \approx G_{\tilde{c}}$ спектр ее собственных значений может содержать положительные значения.)

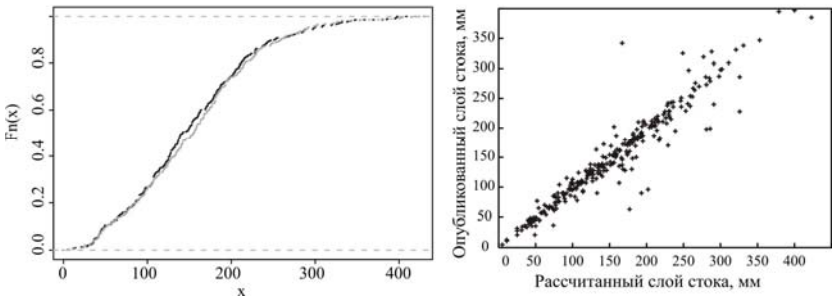
После параметризации (она в нашем случае приведена на географической сетке Северного края с дискретностью 3° по долготе и 2° по широте), встает проблема выбора климатического сценария. Задавая в системе (3) прогнозную норму осадков $\overline{N}_{\mathbf{пр}} (\equiv \dot{\mathrm{X}}_{\mathrm{пр}})$ и параметр $\bar{c}_{\mathrm{пр}} = 1/k_{\mathrm{пр}}$, коэффициент стока в первом приближении оставлен неизменным ($k_{\mathrm{пр}} = k$), рассчитываем значения первых трех моментов распределений, соответствующих прогнозной климатической ситуации.

В нашем случае в качестве климатического сценария выбран COMMIT модель GFDL-CM 2,0 [Solomon…, 2007]. Сценарий носит равновесный характер, и прогностическая задача решается в предположении $dm_i/dt = 0$, т. е. делается алгебраическая оценка ожидаемых моментов m_1, m_2, m_3. Хотя, и в этом случае надежнее C_s не вычислить на основе знания ненадежного момента m_3, задавать исходя из выбранного соотношения C_s/C_v, предположив, что это соотношение не изменится в новых климатических условиях.

Результаты и их обсуждение

Выявление трендов основных статистических моментов проводилось по данным 18 гидрологических постов, расположенных в пределах водно-ресурсной границы Арктики [Никаноров…, 2007] на реках с площадями водосборов не превышающих 50 тыс. км^2, 6 из них расположены на территории Северного края. Расчет слоев стока весеннего половодья проводились по методике ГГИ

[Методические рекомендации…, 1962]. Оценка погрешностей расчетов удлиненных рядов стока проводилась как по отдельному посту, так и по всей совокупности данных. В целом, 75 % рассчитанных слоев стока не отличаются от опубликованных более чем на 10 % (такова точность опубликованных данных). Проверка обеих выборок (расчетной и удлиненной, всего 283 значения) на принадлежность к одной генеральной совокупности осуществлялась по критерию Колмогорова–Смирнова [Митропольский, 1961], значение которого не превышало 0,06. Это на 5 % уровне значимости означает, что рассчитанные данные статистически не различимы (рис. 1, *а*), коэффициент корреляции между рассчитанными и опубликованными данными составил 0,96 (рис. 1, *б*).



а *б*

Рис. 1 Оценка погрешностей методики расчета слоев стока весеннего половодья:
а – эмпирические кривые обеспеченности рассчитанных (серый) и опубликованных (черный) слоев стока; *б* – зависимость рассчитанных и опубликованных данных о слое стока

Статистический анализ однородности по m_1 (t-test), C_v (F-test), C_s (KS-test) удлиненных рядов слоя стока весеннего половодья показал наличие трендов на 50 % репрезентативных водосборов Северного края (табл., рис. 2).

Выявление нарушения стационарности рядов слоя стока весеннего половодья на территории Северного края в пределах водно-ресурсной границы Арктики

Код поста	Река – Пункт	Среднее / стандартное отклонение статистики			Однородность рядов*		
		t-test	F-test	KS-test	m_1	m_2	m_3
70238	Вымь – Весляна	1,32/0,98	1,19/0,78	0,23/0,06	+	+	+
70047	Солза – Сухие пороги	1,65/1,08	1,10/0,59	0,35/0,10	+	+	–
70309	Емца – Ж.Д. мост	0,87/1,13	1,32/0,82	0,26/0,09	+	+	+
70334	Пинега – Кулогоры	0,37/0,55	1,94/0,9	0,26/0,06	+	+	+
70410	Печора – Якша	–0,4/1,17	1,19/0,07	0,28/0,05	+	+	+
70540	Сула – Коткина	1,43/0,78	1,19/0,56	0,38/0,09	+	+	–

Примечания: * «+» – гипотеза об однородности не отвергается; «–» – гипотеза об однородности отвергается.

Прогноз статистических характеристик слоя стока весеннего половодья на новую климатическую ситуацию, соответствующую сценарию COMMIT модель GFDL-CM 2,0, показал, что наблюдаются существенные (более 20 %) изменения коэффициента асимметрии (рис. 3, *б*) и нормы (рис. 3, *а*) стока к 2050 г.

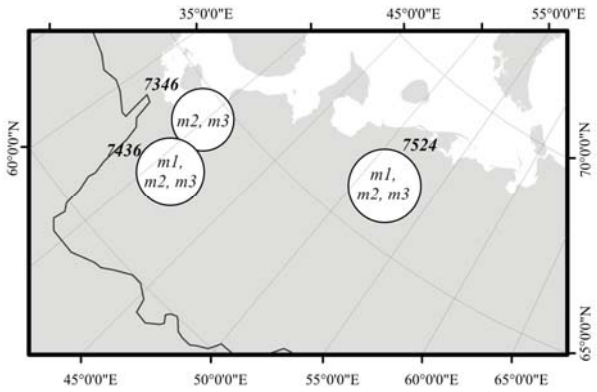
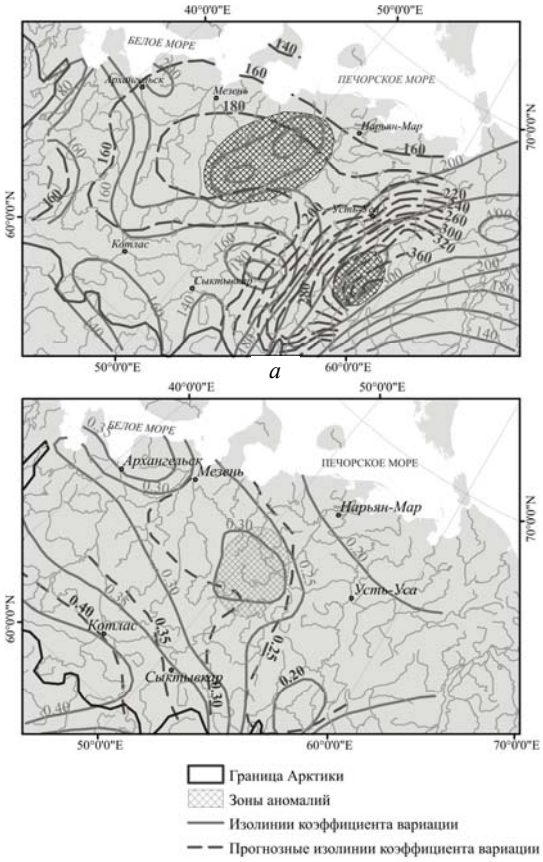


Рис. 2. Расположение водосборов Северного края, по которым наблюдались тренды первого (m_1), второго (m_2) и третьего (m_3) начальных моментов распределений слоя стока весеннего половодья



а

б

Рис. 3. Фактические (карты СНиП) и прогнозируемые к 2050 году нормы (*а*) и коэффициента вариации (*б*) слоя стока весеннего половодья и зоны их аномалий на территории Северного края

Выводы

Появление трендов начальных моментов вероятностных распределений на реках Северного края следует отнести к началу 1980-х. Нарушение стационарности может происходить за счет изменения факторов формирования стока, например, климата, оттаивания вечной мерзлоты, антропогенного воздействия на водосборы. В условиях нестационарности определение расчетных гидрологических характеристик для обоснования строительных проектов ненадежно [Коваленко, 2009].

До конца 1970-х на большинстве исследуемых водосборах не было выявлено трендов начальных моментов распределений, карты СНиП [СНиП 2.01.14-82, 1985] представляют статистические характеристики стационарного периода формирования стока весеннего половодья и использованы для параметризации стохастических моделей формирования стока.

На примере климатического сценария COMMIT к 2050 г. получены карты изменения нормы и коэффициента вариации стока весеннего половодья на территории Северного края. Выявлены зоны, где ожидается изменения статистических характеристик слоя стока более чем на 20 % (зоны аномалий), занимающие 30 % (для нормы) и 20 % (для коэффициента вариации) территории арктической зоны Северного края.

Исследования выполнялись в рамках поисковой научно-исследовательской работы в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг., проект № П740.

Литература

1. *Коваленко В.В.* Моделирование гидрологических процессов. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. – 256 с.
2. *Коваленко В.В.* Частично инфинитная гидрология. – СПб.: изд. РГГМУ, 2007. – 230 с.
3. *Коваленко В.В.* Гидрологическое обеспечение надежности строительных проектов при изменении климата. – СПб.: изд. РГГМУ, 2009. – 100 с.
4. *Методические рекомендации* по составлению справочника по водным ресурсам СССР, вып. 7, ч. 1 Половодье. – Л.: ГГИ, 1962. – 107 с.
5. *Митропольский А.К.* Техника статистических вычислений. – М.: 1961. – 479 с.
6. *Никаноров А.М., Иванов В.В., Брызгало В.А.* Реки Российской Арктики в современных условиях антропогенного воздействия. – Ростов-на-Дону, 2007. – 271 с.
7. Пространственно временные колебания стока рек СССР / Под ред. А.В. Рождественского. – Л.: Гидрометеоиздат, 1988. – 375 с.
8. СНиП 2.01.14-82. Определение расчетных гидрологических характеристик / Госстрой СССР. – М.: Стройиздат, 1985. – 36 с.
9. *Solomon S., Qin D., Manning M., Chen Z., Marquis M., Averyt K.B, Tignor M., Miller H.L.* Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA. 2007. – 996 pp.

Н.Р. Грачев, М.Н. Лукина, Г.Н. Угренинов

ОЦЕНКА ПРИНЦИПИАЛЬНОЙ ВОЗМОЖНОСТИ УЛУЧШЕНИЯ КАЧЕСТВА МОРСКОЙ ВОДЫ У ПОБЕРЕЖЬЯ КУРОРТНОГО РАЙОНА САНКТ-ПЕТЕРБУРГА ПО ЗАВЕРШЕНИИ СТРОИТЕЛЬСТВА КОМПЛЕКСА ЗАЩИТНЫХ СООРУЖЕНИЙ

N.R. Grachov, M.N. Luckina, G.N. Ugreninov

ESTIMATION OF THE PRINCIPLE POSSIBILITY OF THE IMPROVEMENT QUALITY SEA WATER BESIDE SEASIDES OF THE RESORT REGION SAINT PETERSBURG UPON COMPLETION CONSTRUCTION OF THE COMPLEX OF THE DEFENSIVE BUILDINGS

Выявлены факторы возрастания мутности морской воды у побережья Курортного района Санкт-Петербурга. Указаны преимущества метода математического моделирования для оценки экологического эффекта при маневрировании затворами комплекса защитных сооружений. Предложены варианты регламента маневрирования затворами для улучшения экологического состояния прибрежных акваторий восточной части Финского залива.

Ключевые слова: шлейф замутнения, затвор, маневрирование, математическая модель, поллютант.

The Revealled factors of the growth to turbidities of sea water beside seasides of the Resort region Saint-Petersburg. The Specified advantage of the method of mathematical modeling for estimation of the ecological effect under маневрировании затворами of the Complex of the Defensive buildings. The Offered variants of the regulations маневрирования затворами for improvement of the ecological condition coast area of water east part of the Gulf of finland part of the Gulf of Ffinland.

Key words: train замутнения, shutter, маневрирование, mathematical model, поллютант.

Общая схема размещения дамб, водо- и судопропускных отверстий комплекса защитных сооружений (КЗС) Санкт-Петербурга приведена на плане рис. 1. Эта компоновочная схема КЗС соответствует состоянию на 2008 г. Ныне строительство КЗС близится к своему завершению.

Мнение населения о загрязненности акваторий складывается, прежде всего, на основе визуальных оценок. Повышенная замутненность воды – наиболее очевидный признак, указывающий общественности на экологическое неблагополучие моря.

Резкое возрастание мутности воды Невской губы и акваторий восточной части Финского залива происходит преимущественно в результате техногенного сброса в воду твердого материала. В этом отношении особенно заметна роль масштабных работ по формированию морского фасада Санкт-Петербурга и рекультивации подводных карьеров в Невской губе. Сравнительно кратковременное замутнение воды происходит также во время штормов на Ладожском озере

при сильных и продолжительных ветрах северо-восточного и северо-северо-восточного направлений. Последний фактор замутнения воды р. Невы и Невской губы особенно значим в предзимний период, когда при понижении температуры воды существенно уменьшается гидравлическая крупность взвешенных наносов.

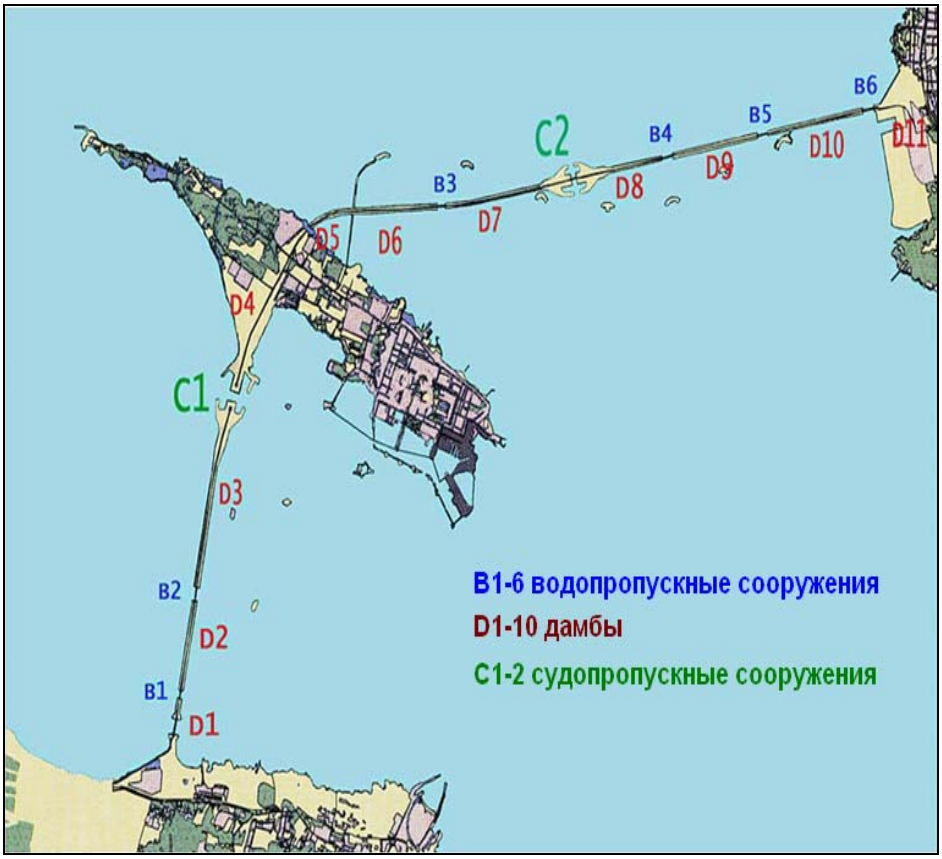


Рис. 1. Схема компоновки комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга

Конфигурация и другие характеристики шлейфов замутнения речных и морских акваторий обычно оцениваются методами физического и математического моделирования. Однако опыт физического моделирования при разработке и обосновании проекта КЗС выявил существенные трудности адекватного представления процессов переноса водных масс и твердого материала. Обеспечение механического подобия натуре вынуждает исследователей затрачивать значительные средства с тем, чтобы устранить негативные последствия искажения масштабов. К примеру, на крупной модели Невской губы, созданной в 1970-е годы в НИИГ им. Б.Е. Веденеева, течения в мелководных зонах Невской губы воспроизводились в потоках с глубинами, соответствующими условиям пристенного слоя.

Методы математического моделирования значительно проще обеспечивают подобие систем различной физической природы, что особенно ценно для воспроизведения условий Невской губы, где скоростная структура чрезвычайно изменчива и способна кардинально перестроиться за несколько часов вслед за переменой погоды.

К достоинствам математического моделирования следует отнести возможность учесть сколь угодно широкий диапазон гидрометеорологических ситуаций, при этом источники загрязнения воды могут быть размещены в любых точках рассматриваемой акватории.

Для оценки процессов переноса взвешенных веществ в Невской губе и восточной части Финского залива использована расчетная программа, созданная под руководством Н.Р. Грачева [1].

Интегрирование системы уравнений движения жидкости и турбулентной диффузии расчетной программой производится в соответствии с методом контрольного объема Патанкара [2], который по определению обеспечивает консервативность расчетной схемы по массе и количеству движения независимо от числа разбиений исследуемой области на объемы, так как основан на дискретизации исходных уравнений в интегральной форме.

Для вычисления интегралов используются кусочные профили, которые описывают изменение функций между узловыми точками сетки контрольных объемов. В результате получается дискретный аналог дифференциальных уравнений.

Расчеты замутнения воды Невской губы и восточной части Финского залива выполнены в рамках следующих допущений:

– при возникновении угрозы наводнения в Санкт-Петербурге и достижении отметки поверхности воды 1,00 м БС в Кронштадте все водо- и судопропускные отверстия перекрываются;

– при отсутствии угрозы наводнения маневрирование затворами судопропускных отверстий (С-1, С-2) не производится.

В качестве расчетных гидрометеорологических сценариев приняты:

– норма расхода воды р. Невы за навигационный период (2990 $м^3/с$);

– среднемноголетние скорости ветра за май–октябрь – по основным румбам;

– штиль.

В качестве одного из результатов моделирования переноса взвешенного в воде материала показаны шлейфы замутнения при штиле в двух ситуациях:

– все затворы КЗС открыты (рис. 2);

– закрыты северные водопропускные отверстия В-4, В-5, В-6 (рис. 3).

Концентрации взвешенных веществ на планах рис. 2 и 3 приведены в относительной форме – в процентах от исходной мутности, принятой за 100 %.

На планах рис. 2 и 3 показано, что в штилевую погоду перекрытие водопропускных отверстий В-4, В-5, В-6 надежно защищает от замутнения прибрежные акватории восточной части Финского залива в Курортном районе Санкт-Петербурга.

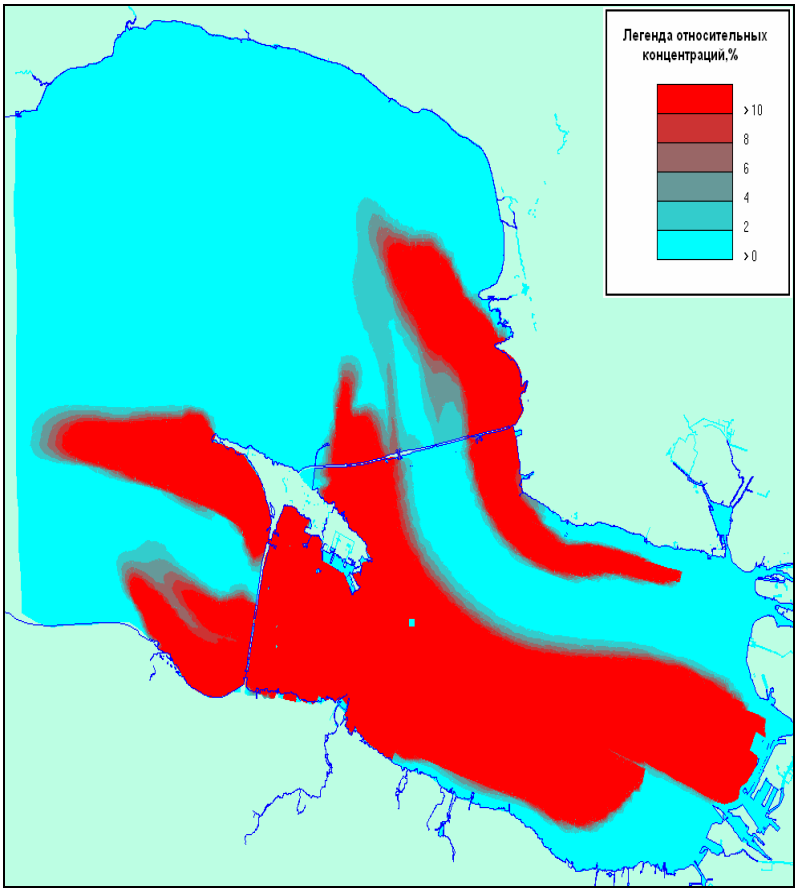


Рис. 2. Шлейфы загрязнений от стационарных источников в условиях штиля (открыты все затворы)

Еще более эффективно перекрытие трех водопропускных отверстий в Северных воротах Невской губы при ветрах южного румба, когда при открытых отверстиях В-4, В-5, В-6 загрязнение прибрежных акваторий Курортного района особенно велико.

В результате моделирования шлейфов замутнения воды Невской губы и восточной части Финского залива составлен примерный регламент маневрирования затворами КЗС с целью улучшения экологического состояния прибрежных акваторий.

С использованием метода математического моделирования возможна количественная оценка распространения шлейфов загрязнения воды Невской губы и восточной части Финского залива консервативными и неконсервативными поллютантами при произвольном размещении источников загрязнения, что особенно важно для оценки воздействия на водную среду аварийных сбросов загрязняющих веществ, в том числе – нефтепродуктов.

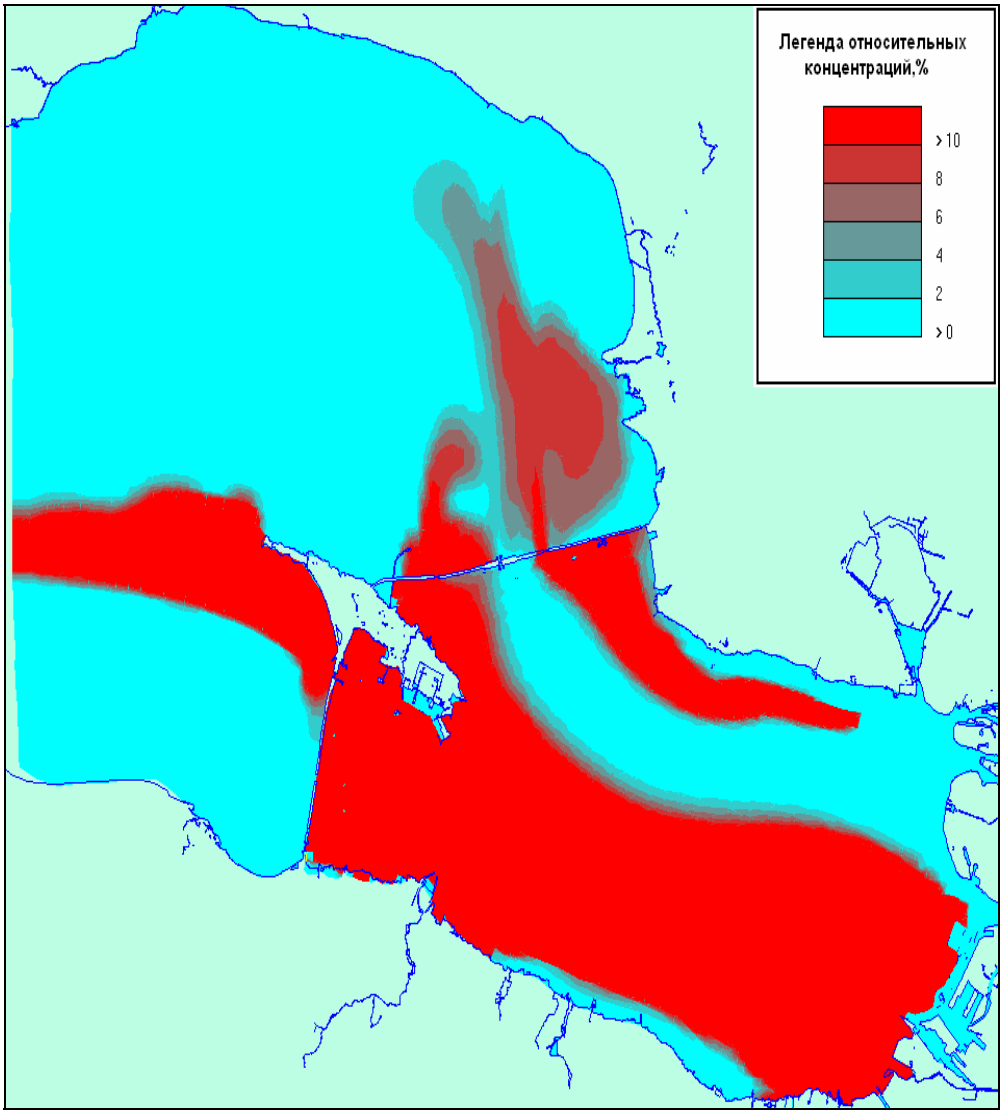


Рис. 3. Шлейфы загрязнений от стационарных источников. Штиль.
Закрыты затворы водопропускных отверстий В-1, В-2, В-5, В-6. Прибрежные акватории у северного и южного побережий Финского залива защищены от загрязнения

Литература

Грачёв Н.Р. Об использовании методов математического моделирования русловых потоков в практике проектирования на водных путях – Водные пути и русловые процессы // Труды Акад. водохозяйств. наук, 1996, вып. 3. с. 52-56.

Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. – М.: Энергоиздат, 1984. – 152 с.

В.А. Бузин, Д.В. Шилов, Н.Ю. Дьяченко, П.В. Солощук

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОПАСНЫХ ЛЕДОВЫХ ЯВЛЕНИЙ НА РЕКЕ НЕВА

V.A. Buzin, D.V. Shilov, N.U. Dyachenko, P.V. Soloshchuk

FORECASTING OF THE DANGEROUS ICE PHENOMENA FOR THE RIVER NEVA

Рассматриваются опасные ледовые явления на реке Нева, развивающееся в процессе её замерзания – образование внутриводного льда, приводящего к закупорке водозаборов, и зажоров, обусловливающих резкое уменьшение стока воды ниже их по течению и наводнения. Излагаются методики прогнозов интенсивности внутриводного ледообразования, максимальных зажорных уровней воды и толщины зажорных скоплений льда.

Ключевые слова: опасные ледовые явления, зажор, прогноз, толщина зажорных скоплений льда, интенсивность ледообразования, река Нева.

The dangerous ice phenomena on the river Neva, developing are considered during its freezing – formation of the intra water ice resulting in corking of water-fences, and ice dams, causing sharp reduction of a drain of water is lower than them on current and flooding. Techniques of forecasts of intensity intra water formations of ice, maximal water levels and thickness congestions of ice are stated.

Key words: dangerous ice phenomena, ice dam, forecast, thickness congestions of ice, intensity ice formation, river Neva.

Река Нева имеет сложный и во многом отличный от других рек России ледовый режим, обусловленный неустойчивым характером погоды зимой и регулированием стока воды в реке глубоководным Ладожским озером.

Особенности ледового режима Невы обусловливают ряд нежелательных ситуаций в жизни Санкт-Петербурга и его пригородов, связанных с перебоем в работе водозаборов из-за забивки их в начале зимы внутриводным льдом и шугой; наводнениями, вызванными зажорами льда на участке Литейный мост – г. Отрадное; подвижками льда, при которых повреждаются причалы, набережные, водозаборы, сносится вниз по течению реки строительная техника, задействованная в ремонте мостов, и снижением расхода воды в реке ниже зажоров до 800 $м^3/с$ (при норме 2500 $м^3/с$). Последним примером может служить зажор в начале зимы 2005 г., приведший к затоплению населенных пунктов в устье р. Ижора.

Образование внутриводного льда является неотъемлемой частью процесса замерзания Невы. Намерзая на решетках водозаборов, он нарушает этим нормальное водоснабжение основных потребителей воды Невы: промышленности Санкт-Петербурга, теплоэнергетики и коммунального хозяйства города. Вода нужна также для многочисленных городков и поселков Ленинградской области, прилегающих к Неве. Водопотребление все время растет. В последние годы из-за теплового загрязнения Невы и, возможно, в связи строительством защитных сооружений в Невской губе и изменением климата на реке в начале зимы все

дольше сохраняется ледостав с полыньями, что благоприятствует внутриводному ледообразованию.

Наиболее опасными ледовыми явлениями на Неве являются зажоры льда (рис. 1).

Рис. 1. Зажор льда у моста Александра Невского зимой 1967–68 гг.

Они наблюдаются на реке почти ежегодно при установлении ледяного покрова, а также зимой во время оттепелей. Иногда они имеют катастрофический характер. В результате зажоров сносятся вниз по течению, а нередко разрушаются суда и строительная техника, задействованная в ремонте невских мостов. Существует и опасность гибели людей, работающих со льда в период замерзания реки. Скопления льда садятся на оголовки водозаборных сооружений, что нарушает нормальную деятельность предприятий и хозяйственных объектов Санкт-Петербурга, расположенных на зажорных участках реки.

Подъемы воды, вызываемые зажорами, ведут к затоплению многих участков прибрежной зоны. За историю Петербурга наблюдалось свыше 80 зажорных наводнений, случавшихся на 22-километровом участке от Охтинского моста до Понтонной (1235 км от устья). Подъем уровня воды из-за стеснения русла реки рыхлым льдом достигает иногда 3,03,5 м, а на участке выше Володарского моста максимальные зажорные уровни превышают нагонные. При мощных зажорах с повторяемостью максимального уровня 1 раз в 2025 лет и реже подвергается затоплению и подтоплению прибрежная территория вдоль Невы и ее притоков – Ижоры, Славянки и Тосны, – большая часть которой плотно застроена; на этой территории находятся десятки промышленных предприятий. В С.-Петербурге, Колпине, Отрадном и Усть-Ижоре затопляется территория площадью 2,5-3,0 км^2, повреждаются причалы, набережные, водозаборы и пр. По данным

столетних наблюдений, продолжительность стояния высоких зажорных уровней иногда бывает более 30 дней.

Зажоры, образующиеся выше Ивановских порогов, вызывают резкое, иногда до 800 $м^3/с$ сокращение расхода воды в реке и падение уровня воды ниже зажора, из-за чего оголяются выведенные в реку водозаборы. Почти по всей реке наинизшие уровни воды отмечаются во время ледовых явлений**.**

Из изложенного выше следует целесообразность надежного прогноза опасных ледовых явлений на Неве.

В настоящее время существуют методики прогнозов зажоров льда и максимальных зажорных уровней воды. Они разработаны в Государственном гидрологическом институте и Северо-Западном УГМС. Теоретические основы причин формирования скоплений льда при замерзании Невы достаточно полно вскрыты в статье К.Е. Иванова и Н.А. Колокольцева [5]. Базируясь на выводах этих авторов, специалисты ГГИ и Северо-Западного УГМС установили прогностические зависимости, основанные на учете уровня воды Ладожского озера в ноябре и ледовой обстановки на Неве в период ее замерзания [4–6].

Часто возникает острая необходимость оповещения предприятий и организаций, имеющих водозаборные сооружения или ведущих строительные работы в русле и на берегах реки, не только о максимальных зажорных уровнях воды, но и о других характеристиках опасных ледовых явлений в период замерзания реки. В частности, для успеха борьбы с внутриводным льдом и зажорами необходимы достоверные сведения об интенсивности внутриводного ледообразования и толщине скоплений льда на различных участках реки, достигающей 5–6 м.

В настоящее время накоплен значительный объем результатов теоретических исследований процесса зажорообразования на шугоносных реках [1-11], который позволяет решить задачу оценки интенсивности внутриводного ледообразования и толщины зажорных скоплений льда.

Для прогноза интенсивности внутриводного ледообразования на Неве использована расчетная схема В.А. Рымши – Р.В. Донченко [10], обоснованная результатами лабораторных и натурных исследований и рекомендованная для использования в расчетах характеристик ледовых явлений при проектировании и эксплуатации гидротехнических сооружений на реках и каналах. Эта схема базируется на теории распределения скрытого тепла кристаллизации переохлажденных масс воды в водных потоках и позволяет определить интенсивность образования льда по глубине потока, а также оценить длительность периода ледообразования. В результате для средней интенсивности образования внутриводного льда в Неве получена формула

$$I_h = -6{,}29(1-\alpha)\frac{\theta}{h}, \qquad (1)$$

где I_h в $кг/м^3 \cdot с$; α – доля теплоотдачи с водной поверхности, в результате которой образовался поверхностный лед; θ – среднесуточная температура воздуха по метеостанции Санкт-Петербург.

Формула (1) позволяет рассчитать среднюю за сутки интенсивность ледообразования по данным об уровне воды и температуре воздуха. Для прогноза нужно иметь данные метеопрогноза с заблаговременностью 5 суток. По уровню Z на дату составления прогноза по кривой $Q(Z)$ определяется расход воды, который используется в прогнозе интенсивности внутриводного ледообразования, поскольку расходы в период замерзания рек изменяются в небольших пределах в течение этого небольшого периода.

Необходимое для определения доля поверхностного теплового пока, приводящего к образованию поверхностного льда

$$\alpha = -0{,}0004\frac{\theta}{A}, \tag{2}$$

значение коэффициента турбулентного обмена (вязкости) водных масс рассчитывается по формуле В.М. Маккавеева [8]:

$$A = \frac{ghV}{C(0{,}7C + 6)}, \tag{3}$$

где g – ускорение свободного падения, м/с^2; V – скорость течения, м/с; С – коэффициент Шези.

Главным фактором, определяющим мощность зажоров на Неве, является водность реки в период ее замерзания (ноябрь–декабрь). Последняя из-за большой зарегулированности стока реки Ладожским озером, меняется после весеннего половодья незначительно, что позволяет использовать для среднесрочного прогноза максимальных зажорных уровней Невы ($Z_{макс}$) уровни и расходы воды в месяцы, предшествующие началу замерзания реки. Для наиболее зажороопасного участка реки у завода «Большевик», где нередко при $Z_{макс} > 3$ м БС происходит затопление прилегающих к реке территорий, удалось выявить достаточно тесные зависимости максимальных зажорных уровней на этом речном участке от средних расходов воды Невы в сентябре (Q_{IX}) и октябре (Q_X):

$$Z_{макс} = 0{,}0013\ Q_{IX} - 1{,}66 \qquad (R = 0{,}727), \tag{4}$$

$$Z_{макс} = 0{,}0015\ Q_X - 1{,}87 \qquad (R = 0{,}782). \tag{5}$$

где R – коэффициент корреляции. Зависимости (7) и (8) позволяют прогнозировать зажорный максимум уровня с заблаговременностью до 1,5 месяца. Точность прогноза по ним вполне достаточна. К сожалению, в оперативных условиях не всегда есть возможность получить сведения о средних месячных расходах воды. Как показали выполненные исследования для прогноза можно использовать и связи $Z_{макс}$ с уровнями воды в истоке Невы у ст. Петрокрепость в сентябре и октябре:

$$Z_{макс} = 1{,}11\ Z_{IX.Петр} - 2{,}70 \qquad (R = 0{,}763), \tag{6}$$

$$Z_{макс} = 1{,}18\ Z_{X.Петр}\ \ 2{,}88 \qquad (R = 0{,}823). \tag{7}$$

Зависимости (4)–(7) установлены по сетевым материалам наблюдений за уровнями и расходами воды, ледовой обстановкой и датами ледовых явлений за период с 1890 по 2008 год.

В оперативных условиях расход воды определяется по кривой связи расхода Невы с уровнем воды у ст. Петрокрепость (R = 0,998)

$$Q = 48{,}791\ Z_{\text{Петр}}{}^2 + 326{,}13\ Z_{\text{Петр}} + 349{,}95 \qquad (8)$$

по мере поступления оперативной информации об уровне воды с гидрологического поста Петрокрепость.

Первый выпуск прогноза приурочивается к 1 октября, когда появляются сведения об уровнях воды Невы в сентябре. Для прогноза используются зависимости (4) и (6). Затем прогноз составляется по зависимостям (5) и (7) 1 ноября. Наконец, он может быть уточнен 1 декабря по краткосрочным методикам, изложенным в работах [4-6] и применяемым в настоящее время в Северо-Западном УГМС.

Эффективность разработанной методики оценивается через критерий, представляющий собой отношение средней квадратической ошибки прогноза (s) к среднему квадратическому отклонению максимального зажорного уровня на участке Невы, для которого составляется прогноз, от его нормы (σ_Z = 56 см). Разработанная методика прогноза максимальных зажорных уровней воды Невы по критерию $\frac{s}{\sigma_Z}$ является согласно Наставлению по службе прогнозов Росгидромета (раздел 3, часть 1) эффективной, так почти все прогностические зависимости характеризуются отношением $\frac{s}{\sigma_Z}$ меньше 0,8.

Для борьбы с зажорами на Неве используются ледоколы. При этом важно знать толщину скоплений шуги и льдин, в которых им предстоит пробивать канал, по которому будет сплавляться ледяной материал вниз по течению реки. Эта толщина может быть найдена из условия равновесия скопления льда. Оно имеет следующий вид:

$$\frac{\delta^2(1-0{,}9\delta)^{10/3}}{\left[\left(r^{3/2}+1\right)^{-1}(1-0{,}9\delta)+0{,}9\delta\right]\left(r^{3/2}+1\right)^{4/3}} = \frac{\gamma_в\left(qn_p\right)^2}{\eta h_з^{13/3}} \qquad (9)$$

[1, 2], где $\gamma_в$ – удельный вес воды, Н/м^3 (9800 Н/м^3); $q = \frac{Q}{B}$ – удельный расход воды, м^2/с; $h_З$ – глубина реки у верхней кромки скопления льда, м; δ – отношение толщины скопления льда к глубине реки; r – отношение коэффициента шероховатости нижней поверхности льда к коэффициенту $n_р$; η – коэффициент физико-механических свойств не сплошной ледяной массы, который находится в зависимости от температурных условий процесса зажорообразования:

$$\eta = -0{,}000006\ \theta_{ср}{}^2 - 0{,}0004\ \theta_{ср} + 0{,}0136, \qquad (10)$$

где $\theta_{ср}$ – средняя температура воздуха за период от даты устойчивого перехода её через 0 °С до даты начала ледообразования.

На рис. 2 приведен график зависимости относительной толщины шуго-ледяного слоя от интегральной характеристики гидравлических условий потока и физико-механических свойств льда $\Gamma = \dfrac{\gamma_в (q n_р)^2}{\eta h_з^{13/3}}$ для Невы у Новосаратовки, где измеряются расходы воды. Расчет координат зависимости Γ = *f*(δ) велся по формуле (9) путем задания и подстановки в неё тех или иных значений δ. Относительная шероховатость нижней поверхности ледяного покрова определена при $n_л$ = 0,01 [9] и $n_р$ = 0,035.

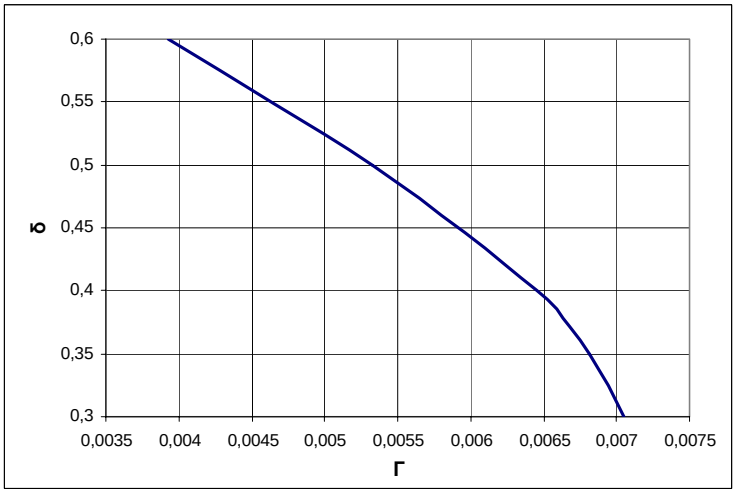


Рис. 2. Зависимость относительной толщины шуго-ледяного скопления (δ) на Неве у Новосаратовки от интегральной характеристики гидравлики водного потока и физико-механических свойств масс льда (Γ)

Установленная зависимость Γ = f(δ) предлагается для прогнозирования толщины зажорного скопления льда по данным прогноза максимального зажорного уровня в метрах БС ($Z_{макс}$), расхода воды (Q) и температуры воздуха (θ) в период образования зажора. С целью предсказания уровня $Z_{макс}$ для Новосаратовки могут быть использованы зависимости, аналогичные зависимостям, приведенным выше:

$$Z_{макс} = 0{,}827\, Z_{IX.Петр} - 1{,}34 \qquad (R = 0{,}701), \qquad (11)$$

$$Z_{макс} = 0{,}896\, Z_{X.Петр} - 1{,}52 \qquad (R = 0{,}782). \qquad (12)$$

При наличии предсказанных значений уровня $Z_{макс}$ и расхода Q сначала определяется глубина реки у верхней кромки зажора ($h_з$). Затем рассчитывается по формуле величина Γ. Далее по зависимости δ = f (Γ) определяется относительная толщина скопления шуги и льдин и вычисляется абсолютная величина

$$h_{ск} = \delta\, h_з\,. \qquad (13)$$

Проверить расчетную схему можно на примере зимы 1952–1953 гг., когда на Неве проводилась ледомерная съемка, выполненная в январе 1953 года. Зима 1952–1953 гг. по высоте подъёма уровней воды, обусловленных зажором на реке, находится на четвёртом месте, что соответствует вероятности превышения этих уровней на участке 12–45 км от устья Невы 8 %. Данные о толщине зажора льда, сформировавшегося на р. Нева в начале зимы 1952–1953 гг., содержатся в каталоге [7]. Выписка из каталога приведена в табл. 1.

Таблица 1

Толщина зажора, сформировавшегося на р. Нева в начале зимы 1952–1953 гг.

Пункт наблюдений	Расстояние от устья, км	Максимальный зажорный уровень воды и его дата		Зажорный подъем уровня, м	Толщина слоя скоплений шуги и льдин, м
		Z, м БС	дата		
с. Ивановское (г. Отрадное)	45	4,12	4,01	2,9	5,0
с. Усть-Славянка	29	3,74	4,01	3,2	5,0
з-д «Большевик» (Обуховский з-д)	23	3,60	4,01	3,3	6,0
Фабрика им. Ногина (Невская мануфактура)	17	2,31	23,12	2,5	6,0

Зимой 1952–1953 гг. максимум уровня воды Невы у Новосаратовки наблюдался 4 января при расходе воды 1390 м^3/с и был равен 3,72 м БС. Этому уровню соответствуют глубина реки у верхней кромки зажора 8,48 м и ширина русла 377 м.

Согласно температурным условиям в период формирования зажора обобщенный коэффициент физико-механических свойств скопления шуги и льдин $\eta = 3{,}07\,\frac{H}{м^2}$. На дату максимального зажорного уровня определяем значение интегральной характеристики гидравлики водного потока и физико-механических свойств масс льда

$$\Gamma = \frac{\gamma (q n_p)^2}{\eta h_з^{4{,}33}} = 0{,}00508\,.$$

По зависимости на рис. 1 этому значению Γ соответствует

$$\delta = \frac{h_{ск}}{h_з} = 0{,}59.$$

Тогда $$h_{ск} = 0{,}59 \cdot 8{,}48 = 5{,}0 \text{ м}.$$

Ближайший к Новосаратовке створ, где измерялась в январе 1953 г. толщина скопления шуги и льда – это Усть-Славянка (табл. 1).

Измеренная толщина равна 5,0 м.

Точность прогнозов, составленных по установленным зависимостям, зависит от обеспеченности этих решений материалами натурных исследований прогнозируемых процессов и явлений. К сожалению, систематические наблюдения за многими важными характеристиками процесса замерзания Невы не ведутся и, в частности, за интенсивностью образования внутриводного льда и толщиной скоплений шуги. На сегодня количественных данных об этих характеристиках очень мало, они носят отрывочный характер. Путем расчетов установлены следующие диапазоны численных характеристик исследуемых явлений: для интенсивности образования внутриводного льда 0,7–7,0 кг/м^3·с, а толщины скоплений шуги и льдин 18 м.

Зависимости, приведенные в статье, могут быть служить основой для реализации автоматизированной системы прогнозирования опасных ледовых явлений на Неве. Функциями этой системы должны быть автоматическое измерение уровня воды Невы у Петрокрепости и Новосаратовки, передача данных измерений по техническим каналам связи в центр их обработки, диагностирование и прогнозирование ледовых ситуаций. Прогностическая информация, передаваемая по межкомпьютерной связи административным органам, позволит своевременно принимать решения о воздействии на ледовые процессы с целью предотвращения возможных ущербов от неблагоприятных ледовых явлений, и более устойчиво работать в начале зимы хозяйственным объектам, расположенным на берегах Невы.

Спектр характеристик зажоров, которые прогнозируются, может быть существенно расширен, для чего требуется в дальнейшем изучить закономерности изменения в ходе процесса зажорообразования толщины скоплений льда. Знание закономерности перемещения вверх по течению кромки ледяного покрова в процессе замерзания реки при наличии более детальных во времени данных о температуре воздуха и гидрологических характеристиках в принципе позволяют решить задачу определения толщины скопления льда на любом участке Невы.

Повысить достоверность прогноза зажоров льда на Неве можно путем введения в прогностические зависимости дополнительных аргументов. Выше описанные условия формирования опасных ледовых явлений на Неве в период ее замерзания указывают на необходимость учета при их прогнозе синоптических условий замерзания реки, определяющих интенсивность ледообразования в Неве, скорости перемещения кромки льда вверх по течению, а также ветровых нагонов и поступления льда из Ладоги в реку.

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. *Бузин В.А.* Результаты расчета зажоров в состоянии равновесия // Труды ГГИ, 1989, вып. 345, с. 54-62.
2. *Бузин В.А.* Условия и прогноз подвижек льда при замерзании реки Нева // Метеорология и гидрология, 1997, № 8, с. 87-94.
3. *Винников С.Д., Севастьянова Н.В.* Оценка количества льда в зажоре р. Невы. – В кн.: Исследование влияния сооружений гидроузлов на ледовый и термический режимы рек и окружающую среду. – Л.: Энергоатомиздат, 1991, с. 102-107.
4. *Донченко Р.В., Щеголева Е.В.* Методика прогноза максимальных зажорных уровней воды реки Невы // Труды ГГИ, 1989, вып. 345, с. 74-81.
5. *Иванов К.Е. Колокольцев Н.А.* Динамика ледостава и зажоров льда на реке Неве // Труды ГГИ, 1950, вып.6, с. 140-195.
6. *Карнович В.Н., Сурикова Ж.Н., Севастьянова Н.В.* Прогноз максимальных уровней воды при зажорах льда на р. Невк // Метеорология и гидрология, 1984, № 12, с. 111-113.
7. *Каталог* заторных и зажорных участков рек СССР. – Л.: Гидрометеоиздат, 1976, т. 1. – 260 с.; т. 2 – 288 с.
8. *Маккавеев В.М.* Теория процессов перемешивания при турбулентном движении свободных потоков и вопросы зимнего режима рек // Записки ГГИ, 1931, т. V, с. 75-117.
9. *Нежиховский Р.А.* Коэффициент шероховатости нижней поверхности шуголедяного покрова // Труды ГГИ, 1964, вып. 110, с. 54-85.
10. *Рымша В. А., Донченко Р. В.* Метод расчета (прогноза) условий образования внутриводного льда // Труды ГГИ, 1962, вып. 93, с. 52-67.

П.В. Солощук

ИЗМЕНЕНИЕ КЛИМАТА И ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ ВОДНОЙ СИСТЕМЫ ФИНСКИЙ ЗАЛИВ–НЕВСКАЯ ГУБА–РЕКА НЕВА В ОСЕННЕ-ЗИМНИЙ ПЕРИОД ЗА ПОСЛЕДНИЕ 15 ЛЕТ

P.V. Soloshchuk

CHANGES IN THE CLIMATE AND ICE CONDITIONS IN THE GULF OF FINLAND–THE NEVA BIGHT– THE NEVA RIVER WATER SYSTEM IN THE AUTUMN-WINTER PERIOD IN THE PAST 15 YEARS

В статье на основе 15-летних наблюдений были исследованы ледовые условия водной системы Финский залив – Невская губа – река Нева и взаимосвязь с изменением климата. В исследуемом регионе при рассмотрении многолетнего хода температуры воздуха на примере Санкт-Петербурга наметилась тенденция общего годового повышения. Средняя температура за исследуемый период на 1,3 ^{0}С выше, чем за весь ряд наблюдений. При анализе ледовой обстановки было установлено, что в последние 15 лет в регионе Финского залива происходят значительные изменения климатических факторов, и как следствие участилось количество мягких зим – сократилась толщина припайного и дрейфующего льда, изменилась кромка льдов. Также в статье проводиться анализ зажорных явлений на р. Нева.

Ключевые слова: изменения температуры воздуха, ледовый покров, ледообразование, зажор, Нева, Финский залив.

In the article the ice conditions for water system of the Gulf of Finland – Neva bay – river Neva and climate changes interrelation in terms of 15-year-old observations have been investigated. The tendency of the general annual temperature increase was noticed in investigated region by consideration of a long-term variation of air temperature as an example of St.-Petersburg. The average temperature for the investigated period was by 1,3 ^{O}C above, than for all number of observation. The analysis of ice conditions http://www.multitran.ru/c/m.exe?t=2853459_2_1*has been established last 15 years for the region of the Gulf of Finland there are important changes of climatic factors has changed and as a consequence of this the quantity of mild winters has been increased (fast and drifting ice thickness has been reduced, the ice edge has been changed. Also in the article the analysis of ice jam phenomena for the river Neva has provided.*

Key words: changes of air temperature, ice cover, ice formation, ice jam, river Neva, the Gulf of Finland.

Климат – это многолетний режим погоды, характерный для каждого места Земли, определяемый географическими условиями этой местности. Представления о климате складываются на основе статистической обработки многолетних метеонаблюдений – климатообразующих процессов, которые непрерывно происходят при взаимодействии атмосферы с космосом и земной поверхностью. Таким образом, климат – одна из важнейших географических характери-

стик местности. Климат всегда меняется и в последние десятилетия эти изменения наиболее заметны. Вот почему мы говорим об изменении климата сегодня.

Изменение климата и проблема потепления на Земле напрямую отражается на ледовой обстановке водных систем в северном полушарии. Рассмотрим эти изменения на примере водной системы Финский залив–Невская губа–река Нева, которая играет существенную роль в экономике Санкт-Петербурга. Ледовые условия является одной из наиболее важных характеристик состояния поверхности залива в зимний период и имеет огромное значение в хозяйственной деятельности. Исследование ледовых условий представляет не только научный, но и большой практический интерес. Финский залив – это район развитого круглогодичного судоходства, для которого изучение ледовой обстановки является необходимым условием нормальной работы портов и флота. Во льдах Финского залива осуществляется ледокольная проводка караванов судов в порты Санкт-Петербурга, Выборг и Высоцк, танкеров – в нефтеналивные порты Приморск и Усть-Лугу. Поэтому важной задачей является постоянное слежение за ледовой обстановкой в акватории Финского залива в зимний период. Для реки Нева, изменение ледовых условий важно при планировании закрытии навигации.

Под осенне-зимними ледовыми условиями понимаются: сроки первого появления льда, образование неподвижного покрова, ледовитость, толщина льда и другие. Все изменения ледовых условий в регионе тесно связаны с синоптическими обстановками и имеют в большинстве своем сезонный характер соответственно сезонным изменениям погоды.

Ледовый режим водной системы Финский залив–Невская губа–река Нева весьма сложен. Он зависит от климатических, гидрологических и геоморфологических условий. Частая смена арктических холодных воздушных масс теплыми атлантическими в осенне-зимний период обусловливает прерывистый характер процесса ледообразования и растянутость его во времени. Особенности ледового режима зависят от ряда особенностей, обусловленных неустойчивостью метеорологической ситуации на северо-западе России, обширностью площади водоемов, большими запасами тепла водных масс и постоянным воздействием ветра различных направлений. Дополнительно к вышесказанному на ледовый режим влияют глубина и влияние речного стока для Финского залива и Невской губы, для реки Нева – разность уровня Ладожское озеро – Балтийское море. Все ледовые процессы в той или иной форме связаны с большой изменчивостью многих параметров в многолетнем цикле, длительностью периода от появления начальных видов ледовых образований до формирования сплошного ледяного покрова по всей акватории водоема. Поэтому ледовые условия в рассматриваемой водной системе отличаются большим разнообразием. И хотя колебания показателей от года к году достаточно велики, характерное повышение средних значений за последние 15 лет относительно всего периода наблюдений отмечается повсеместно.

Еще с начала 70-х годов XX в. в исследуемом регионе при рассмотрении многолетнего хода температуры воздуха на примере Санкт-Петербурга наметилась тенденция общего годового повышения. В частности заметно повысились средние температуры воздуха в течение осени–зимы (рис. 1). В свою очередь, температура является основным определяющим фактором ледового режима для исследуемого региона. За последние 15 лет отмечается, что среднее значение за этот период выше значений за период всего ряда наблюдений. Средняя температура за исследуемый период на 1,3 ^{0}С выше, чем за весь ряд наблюдений.

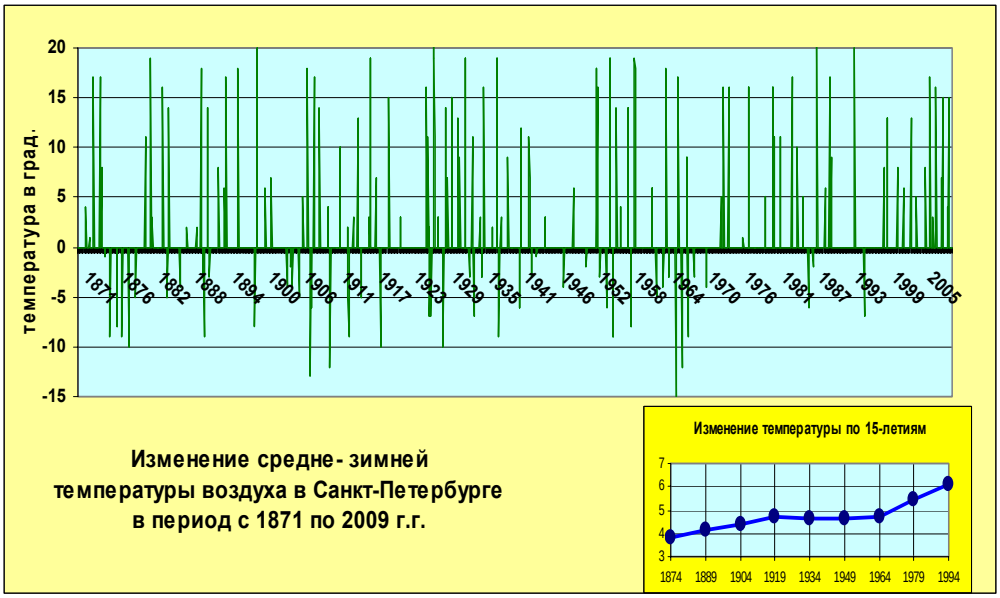


Рис. 1. Изменение средне-зимней температуры воздуха для Санкт-Петербурга и осреднение по 15-летиям

Естественные и вынужденные трансформации климатических факторов в исследуемом регионе привели к изменению средних сроков наступления основных ледовых фаз. И хотя колебания показателей от года к году достаточно велики, характерное отклонение средних значений за последние 10–20 лет относительно всего периода наблюдений отмечаются на большинстве постов Финского залива. Повышение температуры воздуха в рассматриваемом районе – не только зимних, но и среднегодовых, – приводит к более поздним переходам средней суточной температуры через ноль в сторону отрицательных значений осенью.

Финский залив и Невская губа

Судить о потеплении климата можно по типам зим и площади, занимаемой льдами. Принято считать мягкими зимы, при которых кромка максимального распространения дрейфующего льда проходит к западу от острова Гогланд, умеренными – по долготе острова Осмуссаар, суровыми – в северной и даже

в центральной части Балтийского моря. Повторяемость этих типов составляет, соответственно 73, 13 и 13 % за последние 15 лет. Также необходимо отметить, что в рассматриваемый период на акватории Финского залива наблюдались самая теплая зима с 1881 г. – зима сезона 2007/2008 гг. и самая суровая за последние полвека – зима сезона 2002/2003 гг. (табл. 1 и 2).

Анализируя ледовую обстановку можно заметить, что в последние 15 лет в регионе Финского залива происходят значительные изменения климатических факторов, и как следствие участилось количество мягких зим – сократилась площадь дрейфующих и припайных льдов и их толщина. В то же время увеличилась повторяемость аномальных зим, внутри ледовых сезонов наблюдаются резкие изменения погоды и ледовых условий. Граница припая в большинстве зим ограничивается пределами Невской губы, а его толщина не превышает 50 см при среднемноголетних значениях за весь период ледовых наблюдений – 50–60 см. Толщина дрейфующего льда также сократилась в среднем на 10–15 см относительно нормы. И кромка льдов начальных видов не выходит за пределы границ Финского залива.

Годы с самой мягкой и самой сложной ледовой обстановкой

Отдельно хотелось бы рассмотреть аномальные условия развития ледовых условий на Финском заливе. В табл. 1 и 2 приведены самые теплые и суровые зимы на Финском заливе. Указаны толщина льда в Невской губе и расположение кромки льда в период максимального развития ледовой обстановки.

Данные из табл. 1 и 2 также убеждают, что количество мягких зим в Финском заливе преобладает и изменения наиболее заметны. Дрейфующие льды в такие зимы занимают лишь половину площади залива. И толщина припайных и дрейфующих льдов существенно меньше среднемноголетних значений – 15–35 см от нормы. В суровые зимы таких заметных различий в толщине льда, как в мягкие зимы, не наблюдается – 10–15 см от нормы.

Таблица 1

Характеристика ледовой обстановки в мягкие зимы

Зима	Тип зимы	Толщина льда в Невской губе	Кромка льда
1994–1995	мягкая	35–45 см	о. Родшер
1999–2000	мягкая	30–45 см	о. Вайндло
2006–2007	умеренно-мягкая	20–35 см	о. Мохни
2007–2008	самая мягкая	15–25 см	о. Бол. Березовый
2008– 2009	мягкая	30–50 см	о. Мохни
Норма	умеренная	55–60 см	о. Осмуссар

Таблица 2

Характеристика ледовой обстановки в суровые зимы

Зима	Тип зимы	Толщина льда в Невской губе	Кромка льда
1993–1994	умеренно-суровая	55–75 см	о. Вилсанди
1995–1996	суровая	50–70 см	о. Готска-Санде
2002–2003	самая суровая	70–90 см	маяк Сырве
Норма	умеренная	55–60 см	о. Осмуссар

Тенденцию к потеплению ледовых условий на фоне изменения климата можно проследить и по срокам появления ледового покрова и очищения ото льда, которые очень важны для планирования зимней навигации на Финском заливе.

Годы с поздним и ранним началом ледообразования

В табл. 3 и 4 представлены годы с ранним и поздним началом непрерывного ледообразования на акватории Невской губы, Выборгского залива и Лужской губы, в которых расположены российские порты. Дополнительно рассмотрены станции Невской губы, где ледовый режим определяется не только естественными климатическими изменениями, но и хозяйственной деятельностью человека. В круглых скобках даются отклонения от нормы.

Таблица 3

Даты первого появления льда и их отклонения от нормы по портам восточной части Финского залива в годы с ранним началом ледообразования

Санкт-Петербург (норма – 22 ноября)	1993–1994	10 ноября (13)
	2002–2003	9 ноября (14)
Кронштадт (норма – 19 ноября)	1994–1995	9 ноября (11)
	1997–1998	5 ноября (15)
Лисий Нос (норма – 12 ноября)	1994–1995	8 ноября (5)
	1997–1998	5 ноября (8)
Выборг (норма – 19 ноября)	2002–2003	24 октября (20)
	2006–2007	6 ноября (14)
Усть-Луга (норма – 23 ноября)	1998–1999	14 ноября (9)

Таблица 4

Даты первого появления льда и их отклонения от нормы по портам восточной части Финского залива в годы с поздним началом ледообразования

Санкт-Петербург (норма – 22 ноября)	2003–2004	9 декабря (18)
	2005–2006	7 декабря (16)
	2006–2007	27 декабря (36)
	2008–2009	18 декабря (27)
Кронштадт (норма – 19 ноября)	1996–1997	16 декабря (28)
	2003–2004	9 декабря (21)
	2006–2007	29 декабря (41)
	2008–2009	17 декабря (29)
Лисий Нос (норма – 12 ноября)	1996–1997	15 декабря (34)
	2003–2004	7 декабря (26)
	2005–2006	4 декабря (23)
	2008–2009	15 декабря (34)
Выборг (норма – 19 ноября)	1996–1997	15 декабря (27)
	2003–2004	11 декабря (23)
	2008–2009	17 декабря (29)
Усть-Луга (норма – 23 ноября)	2006–2007	22 января (53)
	2007–2008	6 января (45)
	2008–2009	4 января (43)

Из представленных выше табл. 3 и 4 очевидно, что наиболее существенные различия отмечаются в годы с поздним ледообразованием. Начальные виды льда в такие зимы образовывались значительно позже среднемноголетних сроков. Лед стал появляться более чем на 3 недели позже нормы. Особенно это заметно на примере порта Усть-Луга, что связано со строительством технологичного промышленного комплекса – лед стал появляться на 1,5 месяца позже нормы. В тенденции позднего появления ледового покрова по всем портам особо выделяется три сезона: 2006/2007, 2007/2008 и 2008/2009 гг. В годы с ранним началом ледообразованием лед в среднем по портам появлялся на 2–3 недели раньше нормы.

Самая холодная и самая теплая зимы в рассматриваемый 15-летний период

Ледовая обстановка в течение *зимы 2007/2008 гг.* развивалась по типу экстремально мягкой зимы и в итоге оказалась самой мягкой за всю более чем 100-летнюю историю наблюдений. Очень тёплая погода в течение всей зимы привела к значительным аномалиям в развитии ледовой обстановки. В частности, впервые в истории на акватории Невской губы не образовался припай, и кромка льда не вышла за пределы долготы острова Сескар. Кроме того, по ряду пунктов определены новые самые поздние даты для сроков устойчивого появления льда, первого полного и окончательного замерзания. Обеспеченность площади льда в период максимального развития составила 100 %. Толщина дрейфующего и припайного льдов в течение всего сезона была значительно ниже нормы и не превышала 30 см.

Ледовые условия на Финском заливе *зимой 2002/003 гг.* оказались аномально суровыми за длительный ряд наблюдений с 1947 г. Такая аномалия была обусловлена целым рядом неблагоприятных факторов и, прежде всего, определялась крайне неблагоприятным развитием крупномасштабных атмосферных процессов в атлантико-евразийском секторе. Зимой 2002/2003 гг. появление льда произошло в необычно ранние сроки, примерно на декаду раньше сроков, характерных для типичных суровых зим. В дальнейшем ледообразование продолжалось очень интенсивно, особенно в конце декабря – начале января, когда нарастание толщины льда происходило также почти с месячным опережением. В дальнейшем, нарастание льда вследствие более мягкой погоды несколько замедлилось, однако толщины льда продолжали оставаться экстремально высокими. Кромка дрейфующего льда на заливе в период максимального развития достигла широты Ирбенского пролива. Толщина льда на заливе в припае достигла 70–90 см, в дрейфующем льду 55–75 см, в торосистом льдус подсовами – местами до 100–120 см и выше.

Река Нева

Одной из особенностей гидрологического ледового режима реки Нева являются зажорные явления, которые из года в год формируются в основном

в одних и тех же местах, как правило, в нижнем течении. Зажорные явления носят характер стихийного гидрометеорологического явления. Подъемы уровней воды, вызываемые зажорами, ведут к затоплению многих участков прибрежной зоны Невы и нарушают нормальную деятельность народно-хозяйственных организаций, расположенных в зоне затопления. Подвижки льда во время зажора могут вызвать навалы льда на берегах, повреждение набережных, повреждение и снос вниз по течению судов и строительной техники, задействованной в ремонте мостов. Основное ядро зажора создается у кромки ледостава и подъем уровня на вышележащем участке продолжается до тех пор, пока участок не покроется неподвижным льдом. Продолжительность стояния высоких зажорных уровней может быть более 30 дней.

Зажорная ситуация на реке Неве отмечается ежегодно. Однако за период последних 15 лет достижение опасных отметок и затопление прибрежных зон Невы отмечалось лишь в 2004 и 2005 гг. (табл. 5). Именно в эти годы наблюдалась высокая водность на Ладожском озере, одна из главных причин возникновения явления. В эти годы сложилась именно такая ситуация. Дополнительное влияние на высоту зажорного уровня оказывают подвижки льда, которые еще больше стесняют живое сечение русла реки.

Таблица 5

Опасные отметки для участков Невы и отметки в сезон 2004/2005 и 2009/2010 гг.

Название участка	Неблагоприятные отметки	Опасные отметки	Сезон 2004–2005	Сезон 2009–2010
Обуховский завод	290 см БС	300 см БС	284 см – 01.01	261 см – 19.12
Усть-Ижора	380 см БС	400 см БС	410 см – 30.01	440 см – 31.12
Ивановские пороги	–	440 см БС	428 см – 02.02	470 см – 31.12

Зажор 2004–2005 гг.

Уровень Ладожского озера за летне-осенний период колебался в пределах нормы, но уже к началу зажорных явлений на реке Неве он превысил среднемноголетнюю отметку на 0,2 м. Это стало одним из основных факторов образования мощного зажора льда. Формирование зажора началось во второй декаде ноября одновременно с образованием неподвижного ледяного покрова на р. Неве.

Основное ядро зажорных скоплений в ту зиму наблюдалось в районе Новосаратовки и Рыбацкого, где отмечались навалы льда на берега и сильное торошение ледяного покрова. Подъем уровня воды выше расположения зажора составил 1,5±2,0 м, толщина же подсов была более 2,5 м. В связи с подпором реки Ижоры отмечалось подтопление поселка Усть-Ижора.

Зажор 2005–2006 гг.

Уровень Ладожского озера за летне-осенний период был выше среднемноголетних отметок на 0,25–0,35 м. К началу зажорных явлений на реке Неве уровень озера был выше нормы на 0,40 м. Резкое похолодание в середине декабря

способствовало интенсивному образованию шуги, быстрому ее смерзанию и быстрому продвижению кромки льда в черте города.

Формирование зажора началось во второй декаде декабря. Основное его ядро находилось между мостом Петра Великого и поселком Усть-Ижора. Зажорный подъем уровня в эту зиму был достаточно высоким, но кратковременным. Отмечались подтопления в поселке Усть-Ижора, городе Отрадное и ряда предприятий, расположенных по берегам реки Невы.

Анализ данных о появлении льда на реке Нева показывает, что в среднем лед образуется в ноябре (при норме 11 ноября для станции Новосаратовка), но за последние года отмечалось 3 зимы, когда лед появился в декабре: зима 1996/1997 – 15 декабря, 2008/2009 – 16 декабря и даже в январе в 2007 – 21 января. Таким образом, река Нева менее зависима от изменения климата в отличие от Финского залива.

Выводы

Из проделанного исследования можно сделать вывод, что зимы стали теплее, ледовые условия мягче. Специалисты-климатологи неоднократно предупреждают, что в ближайшее время произойдет таяние и сокращение льда Северного Ледовитого океана. Для рассматриваемого же региона при сохранении тенденции климата к потеплению, это может привести к тому, что ледовый покров перестанет появляться уже в ближайшем будущем. С точки зрения навигации мягкие зимы благоприятны для судоходства. Продолжительность ледокольной проводки маломощных судов становится минимальной и в российские порты Финского залива мощные суда в течение всего ледового сезона смогут следовать самостоятельно. Также благодаря потеплению река Нева и Ладожское озеро будут позже замерзать осенью, а значит, по Волго-Балтийскому пути можно перевозить больше грузов. Но водная система Финский залив – Невская губа – река Нева является чувствительной экосистемой и является одной из важнейшей составляющей окружающей среды. Сокращение же количества ледового покрова ведет к нарушению экологического, биологического и климатического балансов в районе.

Литература

В статье используются данные из архива Санкт-Петербургского Центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды с региональными функциями.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.3.2 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (государственный контракт № П821 от 17 августа 2009 г.) по направлению «География и гидрология суши».

Н.Б. Барышников, А.О. Пагин, М.В. Соболев

ГИДРОЛОГИЧЕСКИЕ РИСКИ

N.B. Baryshnikov, A.O. Pagin, M.V. Sobolev

HYDROLOGICAL RISKS

Выполнен анализ гидрологических рисков, возникающих при проектировании и строительстве гидротехнических сооружений и водохозяйственных мероприятий за счет гидрологической информации и антропогенного фактора.

Ключевые слова: гидрологические риски, максимальные расходы воды, донные наносы, антропогенный фактор.

An analysis is made of hydrological risks involved in the design and construction of hydraulic structures and water management activities caused by hydrological data and the anthropogenic factor.

Key words: hydrological risks, maximum water discharges, bottom load, anthropogenic factor.

При проектировании и строительстве гидротехнических сооружений и водохозяйственных мероприятий одной из основных составляющих является гидрометеорологическая, геологическая и другая информация о природных процессах. Гидрологическая информация, в частности, основана на вероятностных процессах, что, безусловно, является одной из основных причин гидрологических рисков. В данной статье выполнен анализ некоторых рисков, с которыми сталкиваются проектировщики гидротехнических сооружений.

Наиболее капитальными сооружениями являются плотины ГЭС. Для ГЭС, сооружённых на равнинных и горных реках, риски существенно отличаются. Рассмотрим риски, возникающие при проектировании ГЭС на равнинных реках, из-за гидрологического фактора. Основными расчётными гидрологическими характеристиками являются максимальные расходы воды, а так же их среднемноголетние и минимальные значения. В зависимости от значимости сооружения они рассчитываются на расходы воды 1; 0,33 и даже 0,1% обеспеченности. При этом дополнительно вводятся различные коэффициенты запаса. Как правило, водосбросные сооружения, служащие для пропуска вод паводков и половодий, справляются с поставленными перед ними задачами. Исключением из этого, может быть несовершенство технических решений и антропогенный фактор. Действительно, при пропуске половодий и паводков по техническим причинам могут не сработать (заклинить) те или иные затворы. В качестве примера можно привести Саратовскую ГЭС, где при пропуске половодья произошла задержка включения ряда затворов на водосливных сооружениях. Это привело к сосредоточенному размыву нижнего бьефа. В результате был смыт резервный запас грунта, объёмом в несколько миллионов кубометров. Для предотвращения дальнейшего размыва берега и его укрепления в воду было сброшено несколько десятков тысяч тонн бетонных конструкций. Более сложным является оценка

рисков при затоплении и подтоплении территорий при создании водохранилищ и разрушении их берегов.

В качестве примера можно привести каскад Волжских ГЭС, который должен был решить комплекс проблем: производство электрической энергии, судоходство, орошение и другие. Если проблема энергетики практически решена, то проблема судоходства до сих пор находится в стадии решения. Действительно, планировалось обеспечить с помощью регулирования речного стока водохранилищами минимальную транзитную глубину в 4 м на всей длине Волги и её притоков от Москвы до Астрахани и Ростова на Дону. Сложности возникли на участке длиной 54 км от г. Городец до г. Нижний Новгород. Это обусловлено тем, что водохранилище Чебоксарской ГЭС заполнено не полностью и только до отметки 63 м, вместо 68 м. Выполненные расчёты показали, что при дальнейшем заполнении водохранилища резко увеличиваются площади затопления и особенно подтопления. В частности, помимо плодородных сельскохозяйственных угодий в эти зоны попадают отдельные районы Нижнего Новгорода. Таким образом, вопросы энергетики и судоходства вошли в противоречие с градостроительством и сельскохозяйственным использованием земель. Действительно, на участке Городец – Нижний Новгород транзитные глубины уменьшались до 2,3–2,5 м, землечерпательные работы на участке, достигающие 11,0 миллионов кубометров аллювия в год, не эффективны, так как уменьшение отметок дна компенсируется посадками уровней на ту же величину. Поэтому пропуск судов, имеющих значительно большую осадку, до 4 м, осуществляется на гребнях попусков, т.е. за счёт сброса больших объёмов воды, минуя турбины. Таким образом, не дополучаются сотни тысяч киловатт энергии.

Какие же пути решения этой проблемы? В настоящее время рассматривается два из них: первый, как указывалось, основан на заполнении водохранилища до проектной отметки, но в этом случае велики убытки от затопления и подтопления значительных территорий. Второй путь – основан на предложении сотрудников Нижегородской академии водного транспорта. Суть предложения – строительство на проблемном участке низконапорного сооружения и моста поверх него, расположенных в непосредственной близости от Нижнего Новгорода.

Ещё большие риски возникают из-за несовершенства методов расчётов разрушения берегов водохранилищ. Как правило, жилые посёлки деревни и другие поселения выносятся из зоны затопления и располагаются в непосредственной близости от расчётной границы затопления. К сожалению, можно привести много примеров, когда вновь построенные поселения вынуждены были переносить из-за увеличения зоны разрушения существенно, превышающей расчётную величину. В качестве примера можно привести Братское и особенно Краснодарское водохранилища, где процессы разрушения берегов продолжаются и в настоящее время.

К гидрологическим рискам следует отнести и последствия того, что чаши водохранилищ не расчищались перед их затоплением. В качестве примера мож-

но привести водохранилища Братской и Саяно-Шушенской ГЭС, где были затоплены лесные массивы. Более того, когда «топляки» начали выводить из строя суда и мешать судоходству были созданы специальные подразделения, которые занимались выпиливанием (под водой) затопленных деревьев. Можно привести ещё один пример – Рыбинское водохранилище. Оно заполнялось водой в сложных предвоенных условиях и условиях начала Отечественной войны. Вследствие этого чаша водохранилища не была вычищена. Под водой осталось несколько поселений и значительные заболоченные территории. В результате в водохранилище в последующий период образовались торфяные острова, площадью в десятки квадратных километров и толщиной более десяти метров. Эти острова пришлось разрезать на части и с помощью буксиров вытаскивать на мелководья.

Сложная ситуация, резко увеличивающая гидрологические риски, часто складывается в нижних бьефах ГЭС. Особенно остро обстоит дело, когда в нижних бьефах организуются большие русловые карьеры.

В процессе переформирования русел, обусловленных резким колебанием уровней воды из-за попускового режима работы ГЭС и поступления осветленной воды, обычно наблюдается обрушение берегов (боковая эрозия). Приток наносов в русло за счет такой боковой эрозии значительно увеличивается, что приводит к увеличению заносимости перекатов. Однако зона боковой эрозии русла постепенно смещается вниз по течению, что в совокупности с другими факторами приводит к постепенной стабилизации участков русел, примыкающих к гидроузлам.

В руслах рек, не подпертых гидроузлами, наблюдаются посадки уровней, которые особенно четко прослеживаются при анализе кривых расходов воды, полученных за ряд лет. Так, по данным расчетов, выполненных А. Б. Векслером и В. М. Доненбергом, их значения на ряде участков рек Оби и Волги за период до 25 лет достигли 0,5–1,5 м.

Интересные данные приводит В.В. Дегтярев, исследовавший ряд сибирских рек с целью обеспечения благоприятных судоходных условий на них. В частности, он приводит данные по нижнему бьефу Новосибирской ГЭС. Посадка меженных уровней и изменение характера деформаций произошли здесь в результате как зарегулированности стока, так и забора из русла аллювия. Заложенные в проект ГЭС прогнозы предела максимальных деформаций в нижнем бьефе не оправдались. В проекте предусматривалось, что (за 50 лет эксплуатации ГЭС) зона активного размыва от створа гидроузла не распространится более чем на 3–4 км при посадке уровня на верхней границе участка до 0,5 м. Фактически уже через 25 лет после строительства ГЭС эта зона размыва распространилась на 40 км, понижение проектного уровня в створе гидроузла составило 1,6 м, а по Новосибирскому гидрологическому посту (ниже на 20 км) – примерно 0,4 м. Развитию зоны размыва сопутствует перемещение района отложений.

Зона отложений в 1959–1962 гг. находилась примерно в 20 км ниже ГЭС; в 1963–1967 гг. – в 35–40 км ниже ГЭС, а к 1986 г. – переместилась на участок, расположенный в 130–140 км ниже гидроузла.

В этой зоне из-за интенсивного отложения наносов наблюдается повышение уровней воды при расходах аналогичных тем, которые наблюдались до строительства ГЭС. После смещения зоны вниз по течению кривые расходов воды на некоторое время стабилизируются. Затем после распространения до этого створа зоны размыва начинается посадка уровней воды.

Таким образом, распространение зоны размыва на р. Оби многократно превысило проектные расчеты. Вместо 20 км она достигла 130 км и продолжает продвигаться вниз по течению. Этому также способствовали путевые работы и карьерные разработки. Все указанные выше русловые деформации и сопровождающие их процессы особенно резко проявляются при пропуске паводков редкой обеспеченности.

Уменьшение отметок уровней в нижнем бьефе приводит к снижению базиса эрозии притоков, русла которых также интенсивно размываются.

Все расчётные гидрологические характеристики имеют вероятностный характер. Поэтому нормативные документы обычно рекомендуют принимать для расчётов гидрологические характеристики определённой обеспеченности. Последние зависят от класса и значения данного сооружения. Так, для мостовых переходов при расчётах максимальных расходов воды рекомендуется нижеследующая таблица коэффициентов для переходов от одной обеспеченности к другой (табл. 1).

Таблица 1

Значения коэффициента β

P, %	0,1	0,33	1	2	4	10
β	1,12	1,07	1,0	0,97	0,92	0,86

Однако в этом случае основным риском является появление за расчётный период гидрологического параметра более редкой обеспеченности. Например, ряд конструкций мостов рассчитывается на максимальный расход 1% обеспеченности, но за расчётный период в 100 лет может наблюдаться максимальный расход, но 0,1 или 0,33 % обеспеченности. Это, как правило, должно привести к разрушению моста или отдельных его конструкций.

Однако расчётные значения максимальных расходов воды регламентируются различными в основном ведомственными нормативными документами. Можно привести множество примеров, когда рассчитанные по этим документам мосты, были разрушены при пропуске высоких паводков. Одним из них является катастрофический паводок на р. Висле 2010 г., когда были не только разрушены несколько мостов, но даже были разрушены дамбы ограждения, что привело к затоплению или подтоплению ряда городов Польши, в том числе и Варшавы.

Значительно сложнее и менее определёнными являются расчёты, а точнее прогнозы зажоров и заторов, русловых процессов и донных наносов. Все эти процессы осложняют проектирование гидротехнических сооружений и увеличивают риски их разрушений. Действительно, методики прогнозов заторов и зажоров несовершенны. При их возникновении создаются подпоры, приводящие к значительным подъёмам уровней воды и соответственно большим площадям затопления не только пойм, но и других прилегающих к рекам, пониженных территорий. В качестве примера можно привести последствия зажора на реке Лене, в результате которого были затоплены значительные территории Якутии, включая город Ленск и другие селения. Ещё большую опасность представляют прорывы этих заторов и зажоров, вследствие чего образуются волны прорыва движущиеся с большими скоростями и несущие массы воды и битого льда и причиняющие большой материальный ущерб. В качестве примера можно привести прорыв зажора, образовавшегося на реке Неве в С.-Петербурге выше железнодорожного моста. В результате были срезаны верхние части 40-метровых железобетонных свай-оболочек, используемых при строительстве одной из опор моста Александра Невского.

Следует отметить, что зажоры и заторы обычно образуются в местах расположения перекатов и особенно лимитирующих. Последние, при интенсивном судоходстве обычно разрабатываются, т.е. углубляются, тем самым ликвидируются условия образования зажоров. Причиной же катастрофы на р. Лене явилось то, что в период «перестройки» резко уменьшилось судоходство и из-за отсутствия финансирования Бассейновые управления перестали разрабатывать перекаты.

Другой пример касается попусков из Красноярского водохранилища. Как известно, наибольшее потребление энергии, особенно в Сибири, происходит в зимний период. Поэтому, когда из Красноярского водохранилища через турбинные тракты был сброшен наибольший расчётный расход воды в 4500 $м^3/с$, на нижней кромке полыньи образовался зажор. Прорыв последнего привёл к образованию волны прорыва, затопившей несколько деревень и посёлков при температуре воздуха ниже –20 ^{0}C, что привело к большому материальному ущербу.

Встаёт вопрос, возможен ли в таких случаях достоверный прогноз, который мог бы в значительной степени уменьшить материальный ущерб и в ряде случаев сохранить человеческие жизни? Считаем, что ответ может быть положительным, но при наличии достаточной сети гидрологических и метеорологических постов. К сожалению, ведомственная сеть постов Росгидромета не удовлетворяет этим требованиям, к тому же она недостаточно обеспечена высококвалифицированными кадрами, в частности, инженеров-гидрологов.

Важными для расчётов русловых деформаций, обеспечивающих надёжность работы многих гидротехнических сооружений, являются сведения о расходах донных наносов и, в частности, для расчётов деформаций общего и мест-

ного размывов при проектировании и строительстве мостов, водозаборов и других сооружений. К сожалению, необходимая надёжная информация о них фактически отсутствует. Это обусловлено тем, что наблюдения за стоком донных наносов на сети Росгидромета не производятся. Точнее, они были прекращены в середине 60-х годов прошлого столетия из-за отсутствия надёжных методов и приборов для их измерения. Высокая потребность в информации о них и отсутствие надёжных натурных данных обусловило разработку свыше 200 формул и методов для расчётов расходов донных наносов [Копалиани и др., 2004]. Эти формулы были получены по данным лабораторных экспериментов в узких лотках. Учитывая, что большинство рек России равнинные, имеющие широкие поймы, служащие для пропуска половодий и паводков, основная масса наносов на них проходит именно в периоды паводков и половодий. При движении таких потоков возникает, так называемый эффект взаимодействия руслового и пойменного потоков [Барышников, 2007], приводящий к значительной трансформации полей скоростей взаимодействующих потоков. К сожалению, этот эффект, вскрытый в 50-х годах прошлого столетия, не учитывается ни в одной из расчётных формул. Именно это является одной из причин их низкой эффективности.

Необходимо отметить ещё один из факторов риска, который можно проиллюстрировать на примере разрушения одной из опор моста через реку Кубань (в 7 км от г. Черкесска) при пропуске паводка близкого к 1 % обеспеченности. Пролёты между несколькими опорами моста были забиты различными, поступающими сверху объектами (20 метровые стволы деревьев, карчи и др.). В результате образовался сосредоточенный поток, с расходом воды в 345 $м^3/с$, превышающий расчётный (≈ 200 $м^3/с$) примерно в 1,7 раза, направленный на одну из опор моста (№ 6). Это привело к разрушению основания опоры и, как следствие, к её просадке примерно на 0,4 м и соответственно к разрушению полотна дороги (см. рисунок).

По-видимому, в этом случае ответственность за разрушение опоры моста в основном ложится на антропогенный фактор. Действительно, обслуживающие службы должны были принять соответствующие меры по очистки пролетов моста. Вторым фактором следует считать то, что в данном случае максимальный расход воды, составлявший 1700 $м^3/с$, на 400 $м^3/с$ превышал величину расчётного 1 % расхода.

В то же время катастрофический паводок 2002 г., имевший по данным сотрудников ГГИ значительно больший максимальный расход воды, существенного вреда мосту не причинил. Это ещё раз подтверждает ответственность антропогенного фактора.

Особенно большие риски возникают при разработке русловых карьеров. Последние служат для добычи аллювия, состоящего из песка, гальки, гравия и др. и, как правило, располагаются в непосредственной близости от строящихся объектов и довольно часто непосредственно на территории городов и посёлков. При этом создаётся большая экономия на транспортных расходах. В то же вре-

мя разработка карьеров сопровождается и негативными процессами. Основным из них является посадка уровня, величина которой может достигать нескольких метров. Так, на р. Томи у г. Томска величина посадки уровня достигла 2,8 м, а на р. Стрый – 5 м [Барышников, 2008]. Обычно разработка карьера начинается с выпуклых форм рельефа речного русла (перекатов, островов, осерёдков, побочней и др.), представляющих существенное сопротивление движению речного потока. Только после их сработки происходит разработка пониженных частей русла, т.е. его дна. При этом формируется углубление на дне русла, которое в силу гидравлических условий его обтекания и частичного занесения донными наносами, перемещается вниз по течению реки.

Фрагмент моста через р. Кубань. Вид на опору № 6 после катастрофического паводка в июле 2008 г.

Эти два негативных фактора обычно приводят к большим экономическим ущербам за счёт обнажения водозаборов и водовыпусков, ухудшения судоходных условий, разрушения набережных, пристаней и др. Особенно большой вред наносится экологии окружающей среды. В качестве примера можно привести ранее экологически чистую набережную р. Томи в районе г. Томска, когда после обнажения водовыпуска, все сбросы канализации отлагались на берегу реки.

Особенно острой проблема гидрологических рисков стала в последние 20-25 лет, когда из-за изменения климата и глобального потепления резко увеличилась циклоническая деятельность над Европейским континентом, следствием чего стало усиление мощности и числа катастрофических паводков. Последние наблюдались на реках почти всех Европейских государств, в том числе и на юге России.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.3.1 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственный контракт № П1385 от 2 сентября 2009 г.) по направлению «Снижение риска и уменьшение последствий природных и техногенных катастроф».

Литература

1. *Барышников Н.Б.* Динамика русловых потоков. – СПб.: изд. РГГМУ, 2007. – 347 с.
2. *Барышников Н.Б.* Русловые процессы. – СПб.: изд. РГГМУ, 2008. – 438 с.
3. *Дегтярёв В.В.* Улучшение судоходных условий Сибирских рек. – М.: Транспорт, 1987. – 175 с.
4. *Копалиани З.Д., Костюченко А.А.* Расчёты расхода донных наносов // Сб. работ по гидрологии. № 27. – СПб.: Гидрометеоиздат, 2004, с. 25-40.

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

МЕТЕОРОЛОГИЯ

С.В. Морозова

ФИЗИКО-СТАТИСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ПРОГНОЗА ЭКСТРЕМУМОВ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

S.V. Morozova

PHYSICAL-STATISTICAL METHOD OF FORECASTING EXTREMA OF METEOROLOGICAL VARIABLES

Предлагается физико-статистический метод прогноза экстремумов метеорологических величин с месячной заблаговременностью на основе определения «эталонных» полей и нового принципа аналогичности атмосферных процессов. Описаны этапы расчетной схемы составления прогноза, причем наиболее подробно – блоки для работы в оперативном режиме. Приведена оправдываемость прогнозов волн тепла и холода и периодов выпадения осадков.

Ключевые слова: долгосрочный прогноз погоды, аналогичность атмосферных процессов, принцип периодических составляющих.

The regional model of physical-statistical forecast of sudden changes of day-night air temperature is suggested. The stages of the rated scheme are described and the units for the work in operative regime are described in details. The justification of test results of dependent and independent choice is determined.

Key words: long-term weather forecast, similarity in atmospheric processes, the principle of periodic components.

Общий температурно-влажностный режим месяца создаётся определёнными синоптическими процессами, вызывающими потепления, похолодания и периоды выпадения осадков. Понятно, что эти периоды могут совершенно произвольно чередоваться внутри месяца, но общий температурно-влажностный режим остается постоянным. Поэтому прогнозы среднемесячных и среднесезонных аномалий зачастую не удовлетворяют запросам потребителей. Наибольшую информативную ценность имеют прогнозы экстремумов метеорологических величин, но оправдываемость их, к сожалению, ниже оправдываемости прогнозов среднемесячных и среднесезонных аномалий. Поэтому разработка новых методов прогноза экстремумов метеорологических величин является важной и актуальной фундаментальной научной задачей.

В настоящей работе излагается метод прогноза экстремумов метеорологических величин, позволяющий прогнозировать резкие перепады средней суточной температуры воздуха и периоды выпадения осадков с месячной заблаговременностью.

Основным методом прогнозирования для синоптических и физико-статистических моделей остается метод аналогов, который привлекает внимание кажущейся простотой, физической очевидностью и позволяет автоматически учесть многие линейные и нелинейные связи системы океан-атмосфера-суша. Традиционный принцип аналогичности заключается в том, что, если на некотором участке земной поверхности наблюдается синоптический процесс, идентичный наблюдавшемуся в прошлом на той же территории и примерно в те же календарные сроки, то допускается, что текущий процесс в течение некоторого времени будет развиваться аналогично наблюдаемому в прошлом [Руководство, 1968, 1972].

При разработке физико-статистического метода прогноза экстремумов метеорологических величин расширен традиционный принцип аналогичности и использован метод «плавающего аналога», предложенный В.Ф. Мартазиновой на основе сочетания двухмесячной квазипериодичности атмосферных процессов с обобщением традиционного понятия аналогичности [Мартазинова и др., 1987,1987а, 1991, 1991а, 1986].

Под методом «плавающего аналога» понимается такой способ определения аналогичности атмосферных процессов на Северном полушарии, когда снимается условие их совпадения над одной и той же территорией. Таким образом, при подборе аналога следует учитывать лишь наилучшее геометрическое подобие фигур планетарной высотной фронтальной зоны (ПВФЗ) и текущего синоптического процесса, допуская их географическое несовпадение, если используется АТ-500 гПа. Если же прогноз составляется по приземной карте, то следует стремиться к наилучшему сходству полей в распределении знака барического поля, исключая условие совпадения географических координат.

Учитывая указанные замечания, разработан метод долгосрочного прогнозирования экстремумов метеорологических величин в течение месяца.

Исходными для составления прогноза являются архив барических полей на пространстве I естественного синоптического района (е.с.р.), ограниченного меридианами 30^0 з.д. и 70^0 в.д. и параллелями 40^0 и 70^0 с.ш., представленный ежедневными данными о давлении воздуха на уровне моря, снятых в узлах регулярной сетки с шагом по широте и долготе 5^0, дни резких перепадов средней суточной температуры воздуха и дни выпадения осадков. Дни резких перепадов средней суточной температуры воздуха определялись с помощью введения понятия волн тепла и холода. Под волной тепла (холода) понималось повышение (понижение) средней суточной температуры воздуха не менее чем на $10\ ^0$C продолжительностью 2 и более дней. Пики волн тепла (холода) считались днями резких перепадов средней суточной температуры воздуха.

Расчетная схема составления прогноза включает в себя следующие этапы:

1. В каждом месяце определяются даты резких перепадов средней суточной температуры воздуха отдельно для случаев волн тепла и волн холода и даты

выпадения сильных осадков, суточное количество которых превышает 8 мм в сутки. Такие осадки названы сильными.

2. Согласно определенным датам создается выборка полей давления из архива отдельно для волн тепла и волн холода в каждом месяце, а также для дней с сильными осадками. Для лучшего представления процесса потепления (похолодания) для каждой волны выбирается по два поля – в день пика волны и в день, предшествующий ему.

3. В группах барических полей, относящихся к волнам тепла, к волнам холода и дням с сильными осадками отдельно для каждого месяца определяются эталонные поля давления воздуха по формулам:

$$C(i,\ p) = \frac{1}{q}\sqrt{\sum_{j=1}^{q}(x\,[i,j) - x\,(p,\ j)]^2}, \qquad (1)$$

$$i, p = 1, k;$$

$$q = 147,$$

где $C\ (i,\ p)$ – параметр близости (удаленности) между i-м и p-м барическими полями; $x\ (i, j)$, $x\ (p, j)$ – давление в j-й точке i-го и p-го полей; k – число выбранных полей; q – число узлов регулярной сетки.

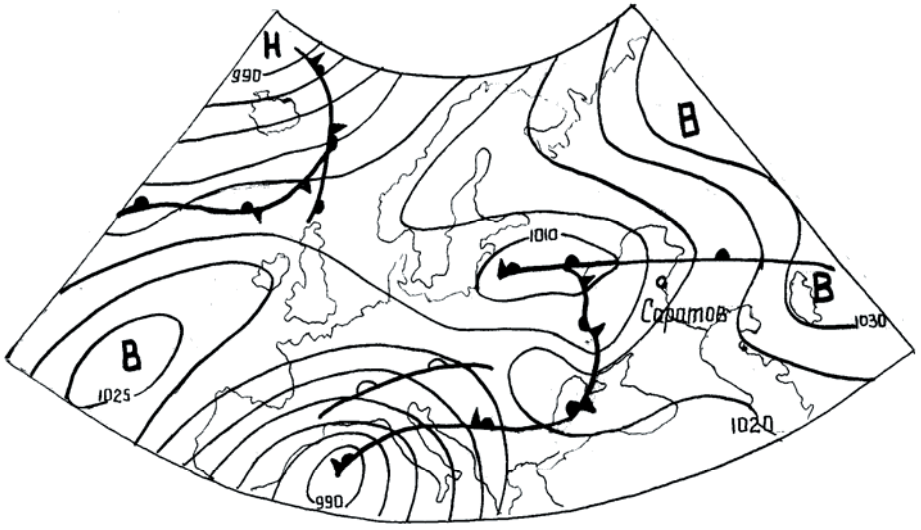
По формуле

$$S\ (i) = \frac{1}{k}\sum_{p=1}^{k} C(i, p) \qquad (2)$$

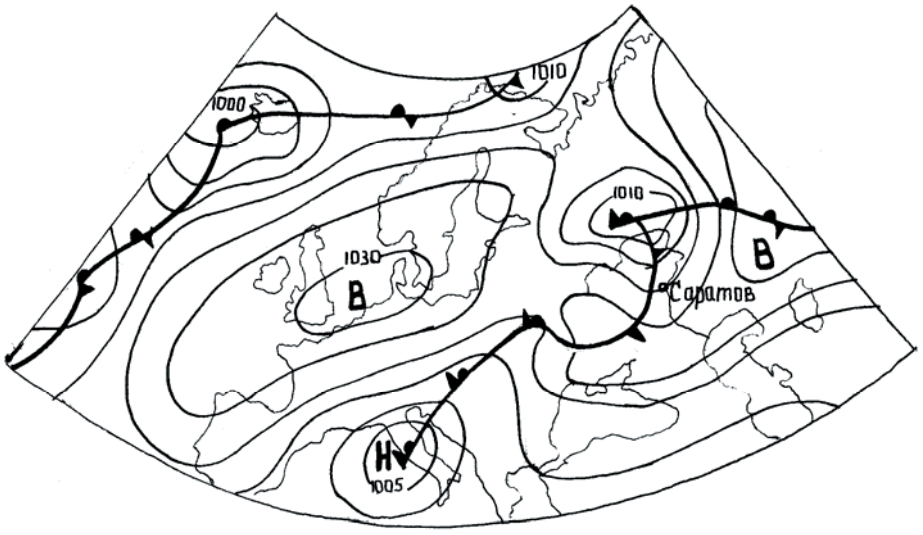
определялось подобие i-го поля со всеми остальными. Наименьшее значение $S\ (i)$ указывает, что i-е поле наиболее близко ко всем p-полям, и поэтому его можно считать эталоном для этих полей. Параметры $C(i,\ p)$ и $S\ (i)$ позволяют объективно выделять эталонное поле давления – конкретное гидрометеорологическое поле, наиболее характерное в данной выборке при сходных процессах.

Синоптический анализ эталонных полей давления для каждого месяца показал, что резкие потепления в каждом месяце вызываются чаще всего распространением на территорию ядер субтропического происхождения или тёплыми секторами полярно-фронтовых депрессий. Как пример, на рис. 1 представлено эталонное поле давления интенсивных волн тепла марта для региона Нижнего Поволжья.

Резкие похолодания в каждом месяце определяются при поступлении на территорию арктических ядер или холодных воздушных масс в тылу циклона. Как пример, на рис. 2 представлено эталонное поле давления интенсивных волн холода апреля при похолодании в Нижнем Поволжье.

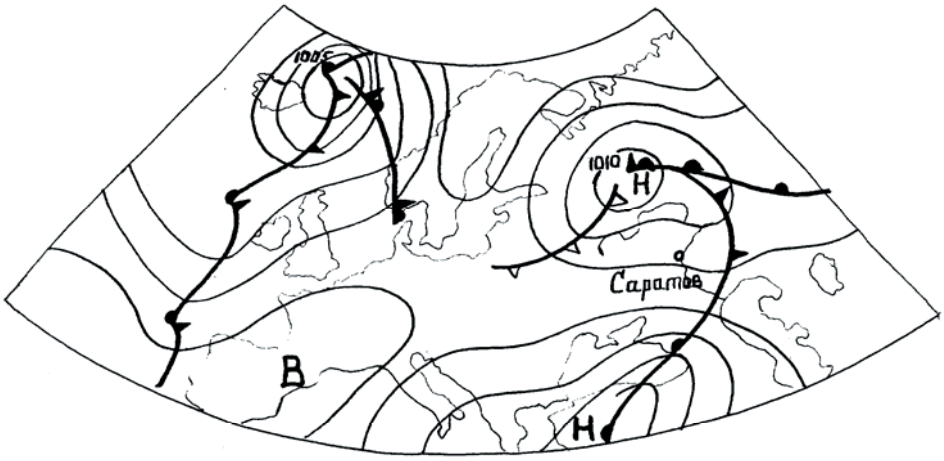


а

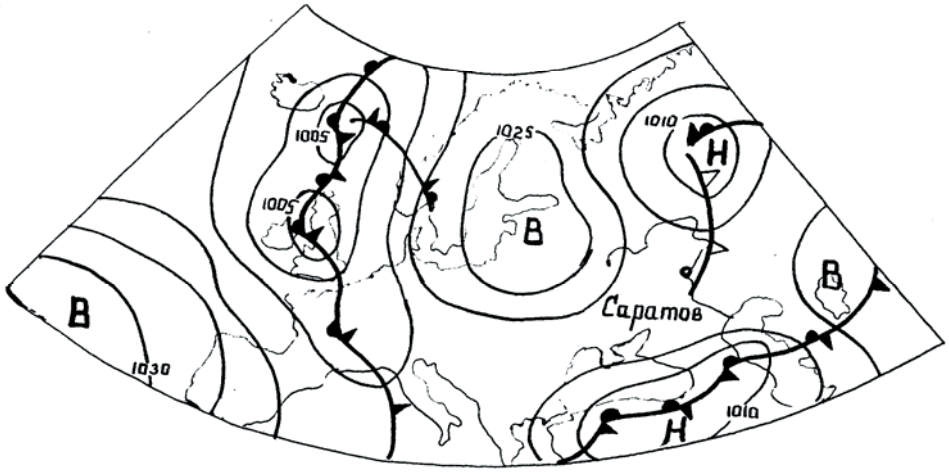


б

Рис. 1. Эталонные поля давления интенсивных волн тепла марта:
а – 24 марта 1991 г., *б* – 25 марта 1991 г.



а



б

Рис. 2. Эталонные поля давления интенсивных волн холода апреля:
а – 24 апреля 1991 г., *б* – 25 апреля 1991 г.

Эталонное поле сильных осадков предполагает наличие над территорией, для которой составляется прогноз, обширной области низкого давления (рис. 3).

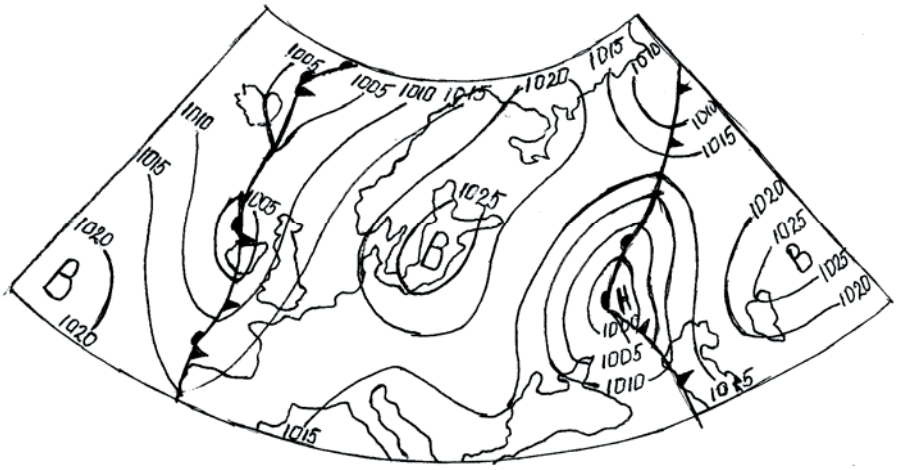


Рис. 3. Эталонное поле давления интенсивных осадков – 29 сентября 1993 г.

Таким образом, на данном этапе получены эталонные поля давления, реальные гидрометеорологические поля, связанные с определенным типом волн в каждом месяце, и наиболее характерные фактические поля, определяющие периоды выпадения осадков.

4. К выявленным эталонным полям давления подбираются аналоги по способу «плавающий аналог» на основе двухмесячной квазипериодичности атмосферных процессов. Согласно этому принципу, аналоговые поля отыскиваются среди ежедневных полей давления, которые отстоят на два месяца назад от эталонных и в каждом случае имеют своё пространственно-временное смещение. Временное смещение соответствует примерно двум месяцам. Пространственное смещение в каждом случае индивидуально, но не выходит за пределы первого естественного синоптического района (±60 ° вдоль круга широты и ±30 ° по меридиану). Отбор аналогов производится с помощью критерия ρ, оценивающей сходство полей по знаку:

$$\rho = \frac{n_+ - n_-}{N}, \qquad (3)$$

где n_+ – число узлов, в которых знак отклонения давления сравниваемых полей совпадает; n_- – число узлов, в которых знак отклонения давления сравниваемых полей противоположный; N – общее число узлов регулярной сетки.

Определенные таким образом аналоговые поля являются предикторами полей давления, обусловливающих резкие изменения температуры воздуха в течение месяца и периоды выпадения осадков. Так же, как и эталонное поле, поле аналога - конкретное гидрометеорологическое поле (в данном случае поле давления), отвечающее за прогностическое осуществление волн тепла (холода) или выпадение осадков.

5. Для составления прогноза на конкретный месяц используются аналоговые поля давления, отвечающие за прогностическое осуществление волн тепла (холода) и выпадения осадков в нем и ежедневные (текущие) поля давления месяца, отстоящего на один месяц назад от прогнозируемого.

С помощью показателя $C(i, p)$ сравниваются аналоговые и текущие поля и определяются даты, в которые значения параметра $C(i, p)$ наименьшие, что указывает на наилучшее сходство аналоговых и текущих полей в эти дни.

6. Согласно определенным в предыдущем пункте дням и по принципу двухмесячной квазипериодичности атмосферных процессов определяются даты экстремумов волн тепла (холода) в прогнозируемом месяце и периоды выпадения осадков, а именно, определенные в предыдущем пункте даты с точностью ±1 день указывают на осуществление волн тепла (холода) в прогнозируемом месяце и периоды выпадения осадков.

Таким образом, по описанной схеме составления прогноза возможно прогнозирование экстремумов метеорологических величин с заблаговременностью один месяц.

Ниже приводится алгоритм составления прогноза для работы в оперативном режиме, который состоит из трех основных блоков (рис. 3).

Рис. 3. Алгоритм рабочей схемы составления прогноза

I блок – блок ввода исходных данных. Вводятся 30 барических полей из архива прошедшего месяца (например, 1–30 июня 2003 г.) и вводятся аналоги эталонных барических полей, определяющих резкие потепления и похолодания во втором месяце вперед от прошедшего (например, по прошедшему июню прогнозируется будущий август). В данном случае вводятся аналоги эталонных полей давления волн тепла и холода августа.

II блок – рабочий. В этом блоке производится расчет параметра $C(i, p)$ и отбор полей по минимальным значениям этого параметра.

III блок – составление прогноза. Присвоение осуществления волн тепла (холода) дню прогнозируемого месяца из условий двухмесячной квазипериодичности. Например, если наименьшие значения параметра $C(i, p)$ в случае волн тепла приходятся на 1 июня, то (1 июня + 60 дней = 1 августа), следовательно, 1 августа ожидается резкое потепление. Аналогично определяются дни с резким похолоданием. Поскольку в первых числах июля имеем прогноз на 1 августа, то заблаговременность оказывается равной одному месяцу. Таким образом, получаем прогноз резких колебаний средней суточной температуры воздуха с месячной заблаговременностью. Аналогично определяются периоды выпадения осадков. Подробный алгоритм рабочей схемы представлен на рис. 4.

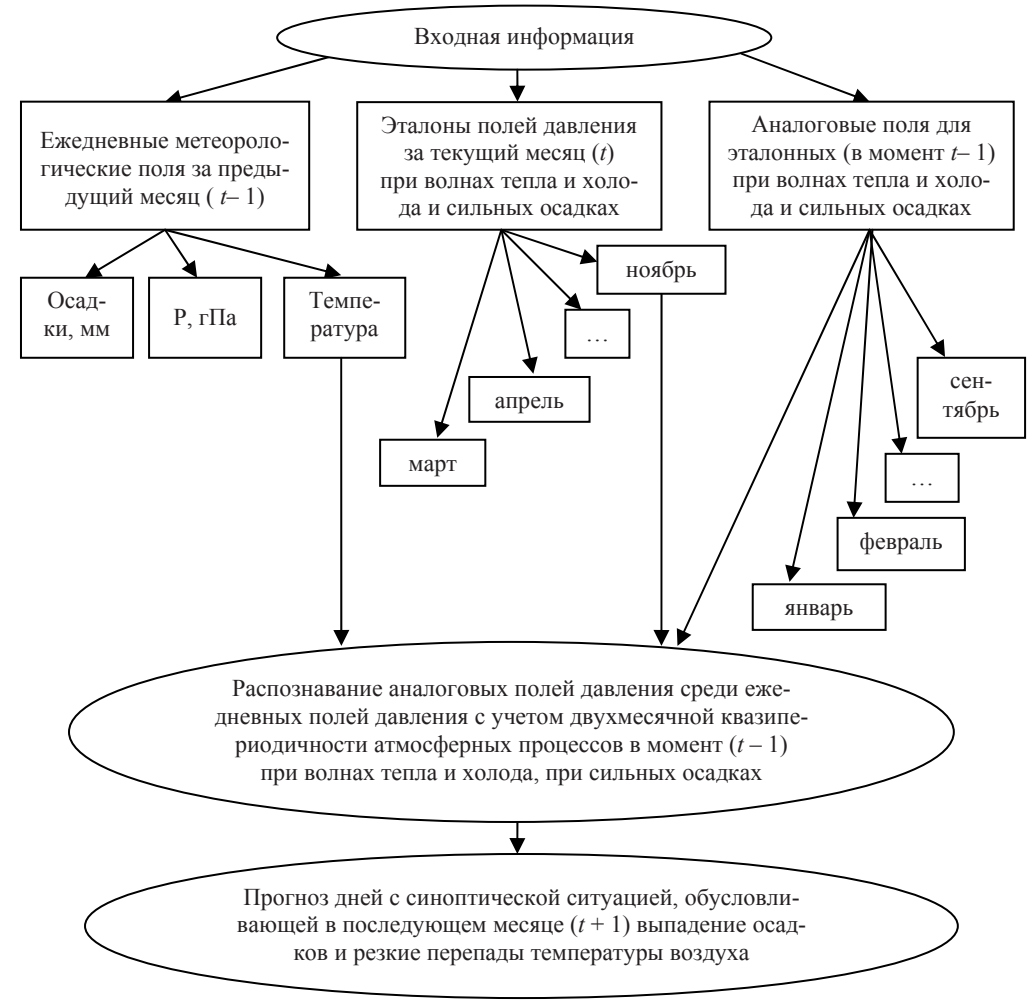


Рис. 4. Схема прогноза волн тепла и холода с месячной (t + 1) заблаговременностью

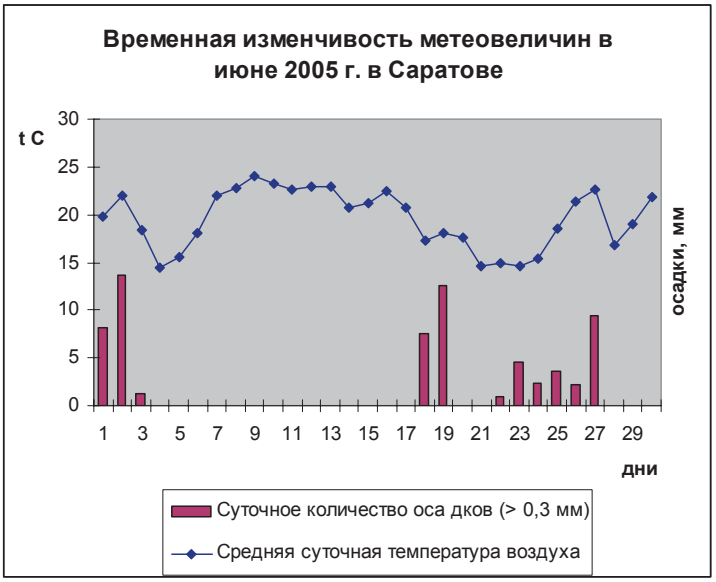
Вид прогностической продукции представлен в таблице, где в качестве примера приведен прогноз на июнь 2005 г., составленный 1 мая 2005 г.

Прогноз резких изменений погоды в июне 2005 г.

Ожидаемые даты		
волн тепла	волн холода	выпадения осадков
1–2	5–6	1–2
12–15	22–25	14–15
26–27		22–25

Таким образом, в июне 2005 г. резкие потепления ожидались 1–2, 12–15 и 26–27 июня, резкие похолодания – 5–6 и 22–25 июня; выпадение осадков предполагалось 1–2, 14–15 и 22–25 июня. При проверке волна тепла (холода) счита-

лась оправдавшейся, если наблюдалось повышение (понижение) средней суточной температуры воздуха не менее чем на 5 °С и время осуществления экстремума волны либо совпадало с днем прогноза, либо сдвиг не превышал ± 2 дня. Прогноз дней с осадками считался оправдавшимся, если факт их выпадения отстоял не более чем на два дня от ожидаемой даты их выпадения и суточное количество составляло не менее 0,3 мм. На рисунке представлена изменчивость средней суточной температуры воздуха и дни суточное количество осадков в июне 2005 г.



Как видно из рисунка, максимальные повышения температуры наблюдались 1–2, 8–9 и 26–27 июня, а ожидаемые – 1–2, 12–15 и 26–27 июня. Таким образом, из трёх волн тепла оправдались первая и третья, а потепление, рассчитанное на начало второй декады, осуществилось раньше – в конце первой декады, но по критериям оправдываемости превышен допустимый временной сдвиг и вторая волна тепла отнесена к неоправдавшимся. Из прогнозируемых двух волн холода оправдались обе, причем первая с абсолютной точностью, а вторая – раньше на два дня, что вполне допустимо. Из трёх периодов выпадения осадков оправдались все, так как здесь не превышен временной сдвиг (не более двух дней) согласно критериям оправдываемости.

Проверка успешности прогнозов за 2005–2010 гг. показала, что они имеют довольно неплохую оправдываемость – для волн тепла – 71%, для волн холода – 69% и для осадков – 65%. Учитывая довольно успешную оправдываемость прогнозов при довольно жёстких критериях, изложенный метод прогноза следует считать перспективным для прогноза экстремумов метеорологических величин.

Литература

1. *Мартазинова В.Ф.* Временная изменчивость ультрадлинных волн общей циркуляции атмосферы // Труды УкрНИГМИ. 1987. Вып. 225, с. 78-84.
2. *Мартазинова В.Ф.* К вопросу о временной изменчивости зональных составляющих общей циркуляции атмосферы // Труды УкрНИГМИ. 1987. Вып. 225, с. 73-78.
3. *Мартазинова В.Ф., Мельник Н.П.* Результаты испытаний детализированного прогноза приземного давления по методу «плавающий аналог» для пятидневки по территории I е.с.р. и территории Украины // Труды УкрНИГМИ. 1991. Вып. 239, с. 75-81.
4. *Мартазинова В.Ф., Сологуб Т.А.* Определение квазипериодичности атмосферных процессов на северном полушарии с помощью метода «плавающий аналог» // Труды УкрНИГМИ. 1986. Вып. 219, с. 37-42.
5. *Мартазинова В.Ф., Сологуб Т.А., Иванова Е.К., Мацак В.В.* Аномальные атмосферные процессы над Украиной и их прогноз с месячной заблаговременностью // Труды УкрНИГМИ. 1991. Вып. 239, с. 63-68.
6. Руководство по долгосрочным прогнозам погоды на 3–10 дней. – Л., 1968.
7. Руководство по месячным прогнозам погоды. – Л.: Гидрометеоиздат, 1972. – 366 с.

Х.К. Нгонголо, С.П. Смышляев

СООТНОШЕНИЯ МЕЖДУ СЕЗОННЫМИ ОСАДКАМИ С МАРТА ПО МАЙ В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ ВОСТОЧНОЙ АФРИКЕ И КВАЗИДВУХЛЕТНИЙ ЦИКЛ СТРАТОСФЕРНЫХ ПЕРЕНОСОВ (КДЦ)

H.K. Ngongolo, S.P. Smyshlyaev

THE RELATIONSHIPS BETWEEN THE MARCH-MAY SEASONAL RAINFALL IN EQUATORIAL EAST AFRICA AND QUASI-BIENNIAL OSCILLATION (QBO) IN THE LOWER EQUTORIAL STRATOSPHERIC ZONAL WINDS

Корреляционный и композитный анализ связей интенсивности осадков в течение сезона продолжительных дождей в Восточной Африке с фазами КДЦ в стратосферном зональном ветре использовался для исследования прогнозирующего потенциала информации о фазах КДЦ для количества осадков в сезон продолжительных дождей с использованием данных за период с 1979 по 2003 г. Показано, что наблюдаемое количество осадков выше/ниже нормы в Экваториальной Восточной Африке связано с западными/восточными фазами стратосферного зонального ветра соответственно.

Ключевые слова: КДЦ-индекс, SOI-индекс, март по май – сезон дождей в Восточной Африке.

In this study, simple correlation and composites analysis based on the phases of the QBO was used to examine the teleconnections between March to May seasonal rainfall over East Africa and the different QBO phases in the stratospheric zonal wind and also explore the predictive potential of the long rainy season using information about the phases of the QBO for the period 1979–2003. It is shown that, above/below normal rainfall in equatorial eastern Africa is associated with the stratospheric westerly/easterly zonal wind phases.

Key words: QBO-Index; SOI index; March to May seasonal rainfall in East Africa.

1. Введение

В экваториальной Восточной Африке регулярно отмечаются два главных сезона дождей, а именно период продолжительных дождей (с марта по май) и период кратковременных дождей (с октябрь по декабрь). На формирование особенностей сезонов дождей в исследуемом регионе определяющее влияние оказывают изменение температуры поверхности океана (ТПО) и фазы Эль-Ниньо южного колебания (ЭНЮК). В исследованиях соотношений между интенсивностью сезонов дождей над Восточной Африкой и ТПО и ЭНЮК больше внимания традиционно уделяется периоду кратковременных дождей [10, 13, 15], а анализу и прогнозу более важного для сельскохозяйственного производства и других социально-экономических деятельностей во многих областях региона сезону продолжительных дождей уделяется относительно меньше внимания. При этом при анализе влияющих факторов межгодовой изменчивости интен-

сивности осадков в тропиках в основном рассматривается роль ЭНЮК, а другие важные долгосрочные факторы изменчивости климата мало учитываются. Однако сезон продолжительных дождей связан со сложными взаимодействиями между многими региональными и крупномасштабными процессами, вызывающими большую неоднородность в пространственном распределении осадков [1, 11, 14, 17] и мала связанными с фазами ЭНЮК [15]. В этой связи для анализа наблюдаемых особенностей сезона продолжительных дождей и выделения определяющих предикторов необходимо рассматривать и другие влияющие на интенсивность осадков климатические факторы.

Одним из процессов, определяющим климатическую изменчивость в экваториальной зоне, в целом, и интенсивность осадков, в частности, является квазидвухлетняя циркуляция (КДЦ) [3]. КДЦ – квазипериодическое изменение знака зонального ветра на высотах тропосферы и стратосферы от восточного к западному направлению и наоборот с периодичностью около 28 месяцев. Результаты многих работ показали сигнал КДЦ в различных атмосферных параметрах и различных областях Земного шара [2, 8, 9, 11]. Среди этих стратосферных и тропосферных переменных можно отметить температуру, содержание озона, интенсивность индийских муссонных осадков и африканских осадков [12, 14, 19].

Как показали предыдущие исследования [3, 4, 18], для проблемы анализа и прогноза интенсивности осадков в экваториальной зоне определяющую роль играет изменчивость стратосферного зонального ветра, поэтому в настоящей работе рассматривается только влияние стратосферной КДЦ на особенности сезонов дождей в Восточной Африке. Предполагается [3], что стратосферная КДЦ формируется, прежде всего, в результате взаимодействия собственных экваториальный волновых мод со средним зональным потоком через механизм передачи импульса среднему зональному потоку в процессе разрушения волн при перемещении по высоте [3].

Процессы ЭНЮК и КДЦ являются связанными [6], причем направление воздействия идет со стороны ЭНЮК, в результате чего Южное Колебание (ЮК) основного периода может удвоить период колебаний КДЦ, что, в свою очередь, приводит к двукратному изменению знака зонального ветра в течение года. С другой стороны, КДЦ также может воздействовать на ЭНЮК, увеличивая главное отрицательное изменение ЮК, которое связано с событием Эль-Ниньо Южное Колебание (ЭНЮК) [6]. Таким образом, на развитие ЭНЮК может оказывать воздействие восточная фаза КДЦ в нижней стратосфере [6].

Связь между ЭНЮК и КДЦ необходимо учитывать при поиске оптимальных предикторов интенсивности осадков и других климатических параметров в тропической зоне [6]. Много попыток было сделано для исследования потенциала предсказуемости сигналов КДЦ из-за его постоянства и появления во многих атмосферных параметрах [5, 7, 8, 9]. В частности, были обнаружены значительные связи между фазами КДЦ в зональном ветре в нижней стратосфе-

ре (около 30 мб) и изменчивостью летних муссонных осадков в Индии [8, 9]. Было показано, что сильная восточная фаза КДЦ связана со слабыми муссонами, а слабые восточная и западная фазы связаны с активными муссонами. Преобладающие ветра в стратосфере во время летнего муссона являются преимущественно восточными, что приводит к их ослаблению в результате проявления западных фаз КДЦ в нижней стратосфере. Анализ фаз КДЦ и интенсивности осадков в Южной Африке показал значительную корреляцию (+0,6) между КДЦ и региональными осадками для западной фазы КДЦ [7]. Огалло и др. [16] изучали характеристики КДЦ над Восточной Африкой, используя зональные композиты ветра из Найроби, Кении (1 ° 18 ′ ю., 36 ° 45 ′ в.) за период с 1966 по 1987 г. Их результаты, основанные на спектральном анализе, показали господство периода 28 месяцев в зональной компоненте ветра. Результаты также показали некоторые значительные (на 5%-ном уровне) связи между осадками и сигналом КДЦ, основанные на изменении зонального ветра.

Неопределенность в связи между фазами КДЦ и режимом осадков в Юго-Восточной Африке требует дальнейшего исследования этой проблемы с точки зрения поиска оптимальных предикторов интенсивности осадков в течение сезона продолжительных дождей. Поэтому целью настоящей работы является исследование соотношения между различными фазами КДЦ в стратосферном зональном ветре и сезоном продолжительных дождей над Экваториальной Восточной Африкой, а также исследование прогнозирующего потенциала информации о фазах КДЦ для сезона продолжительных дождей.

2. Исходные данные и методология

Ввиду большой изменчивости распределения осадков по области анализ был основан на 11 однородных климатологических зонах (рис. 1), чтобы исследовать связи осадков этих зон с КДЦ. Детали относительно идентификации 11 однородных климатических зон над Восточной Африкой, адаптированные в этом исследовании, могут быть получены из статьи [20]. Средние ежемесячные индексы климата: индекс Южного Колебания (SOI) и индекс глобально усредненного экваториального стратосферного зонального ветра на 30 мб (КДЦ) были получены из базы данных центра анализа климата (CPC/NOAA). Индекс Южного колебания (SOI) и индекс КДЦ взяты за период с 1979 по 2003 г. Стратификация индексов КДЦ была основана на четырех сезонах: с марта по май (MAM), с июня по август (JJA), с сентября по ноябрь (SON) и с декабря по февраль (DJF). Данные об осадках были синхронизированы с данными КДЦ-индексов и индекса Южного Колебания в течение периода с 1979 по 2003 г. Стандартизированные отклонения осадков для Восточной Африки с 71 метеорологической станции и их аномалии были вычислены в течение сезона продолжительных дождей MAM по соотношению: $(X - \overline{X})/\rho$, где X – MAM осадков в год, $\overline{X}$ и ρ – их среднее значение и стандартное отклонение за период

с 1979 по 2003 г. Методология, используемая в этом исследовании, была основана на применении корреляционного и композитного анализа осадков, основанных на фазе КДЦ.

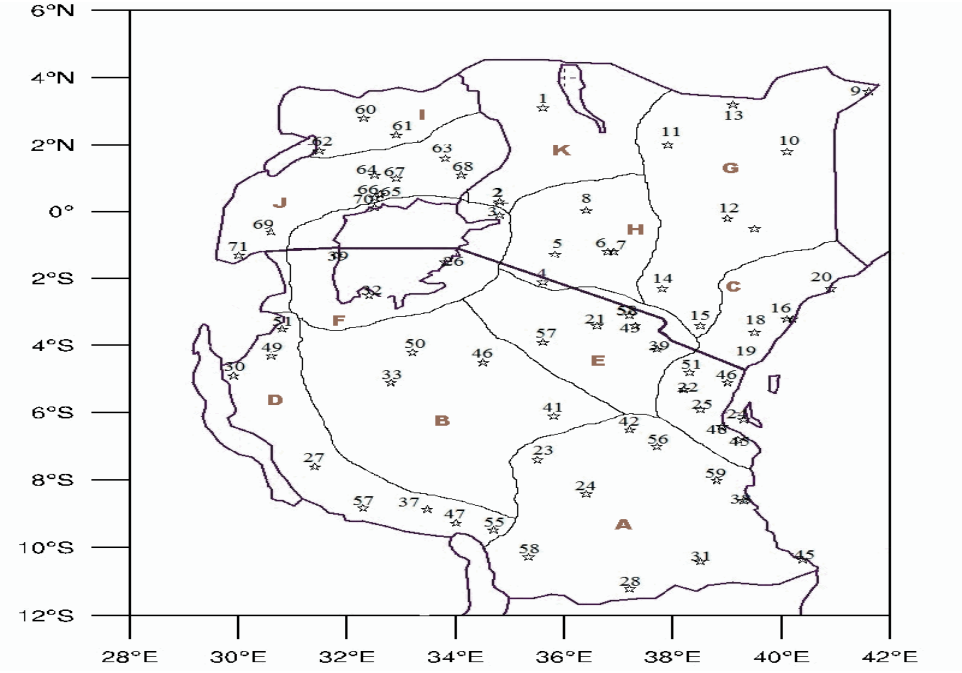


Рис. 1. Климатические однородные зоны Восточной Африки

Цель этого анализа выделение сигнала КДЦ, который может быть использован как переменный предиктор для сезонного прогнозирования. Каждый 71 индекс осадков и региональный временной ряд индекса осадков для 11 зон был сначала коррелирован с экваториальным усредненным стратосферным зональным ветром для идентифицирования пространственной степени соотношений между КДЦ и осадками. Зоны, которые значительно коррелировали с КДЦ, были идентифицированы и кросс-коррелированы с индексом Южного колебания для проверки вклада каждого из двух индексов планетарного климата в сезон продолжительных дождей. Эти временные ряды зон были тогда обобщены в категории использованием таблиц сопряжённости, основанных на западных и восточных фазах КДЦ. Нулевой и лаг-корреляционный анализ использовался в этом исследовании, статистическая значимость коэффициента корреляции (r) протестирована с помощью Z-преобразования Фишера и критерия Стьюдента. Статистика Стьюдента использовалась для решения значительной корреляции от матрицы [22]. Образцы пространства и времени значительных корреляций использовались для исследования связи между индексом КДЦ и индексом Юж-

ного колебания и региональными осадками. Коэффициент корреляции (r) рассчитывался по формуле:

$$r = \frac{\sum_{1}^{N}(Y_i - \overline{Y})(X_i - \overline{X})}{\sqrt{\sum_{1}^{N}(Y_i - \overline{Y})^2 \sum_{1}^{N}(X_i - \overline{X})^2}}, \quad (1)$$

где $\overline{Y}$ – среднее значение для $Y_1 \ldots Y_N$; $\overline{X}$ – среднее значение для $X_1 \ldots X_N$; N – размер выборки, $-1 \le r \le 1$ – положительные и отрицательные значения, показывающие положительные или отрицательные отношения, соответственно. Оценка эмпирического коэффициента корреляции проводится с помощью Z-преобразования Фишера:

$$Z = \frac{1}{2} In \frac{1 + r}{1 - r} \quad (2)$$

и критерия Стьюдента $\left|\frac{Z}{\sigma_Z}\right| \ge \alpha_{KP}$, где α_{KP} соответствует 5, 1 или 0,1 %-ному уровню значимости. Среднеквадратическое отклонение параметра Z равно:

$$\sigma_Z = \frac{1}{\sqrt{N - 3}}. \quad (3)$$

В композит-анализе использовались годы, которые имеют осадки выше нормы и совпадающие с западными фазами КДЦ, а также годы с осадками ниже нормы и совпадающими с восточной фазой КДЦ. Годы, имеющие стандартизированный индекс осадков $\ge 0{,}12$, были классифицированы как осадки выше нормы, а годы, имеющие стандартизированный индекс осадков $\le -0{,}12$, были классифицированы как годы осадков ниже нормы. Выбор этого диапазона стандартизированного индекса осадков основан на критерии Стьюдента, примененном на объеме выборки 25 лет. T-показатели на высоких и низких индексах осадков показывают, что два ряда значительно различны на 95%-ном уровне значимости.

3. Анализ результатов

3.1. Связи между сезонными осадками и КДЦ-индексом

Было установлено, что основание для использования низкого экваториального стратосферного зонального индекса ветра в сезонной предсказуемости базируется на его тенденции продолжаться в течение нескольких месяцев после фазового перехода от восточного до западного и наоборот. Рис. 2 показывает нулевую и лаг-корреляцию между сезоном продолжительных дождей по одно-

родным зонам осадков в Восточной Африке и КДЦ-индексом на 30 мб за период с 1979 по 2003 г. Основанные на критерии Стьюдента (объем выборки 25 лет) коэффициенты корреляции [r] ≥ 0,51 представляют собой уровень значимости выше 5 %.

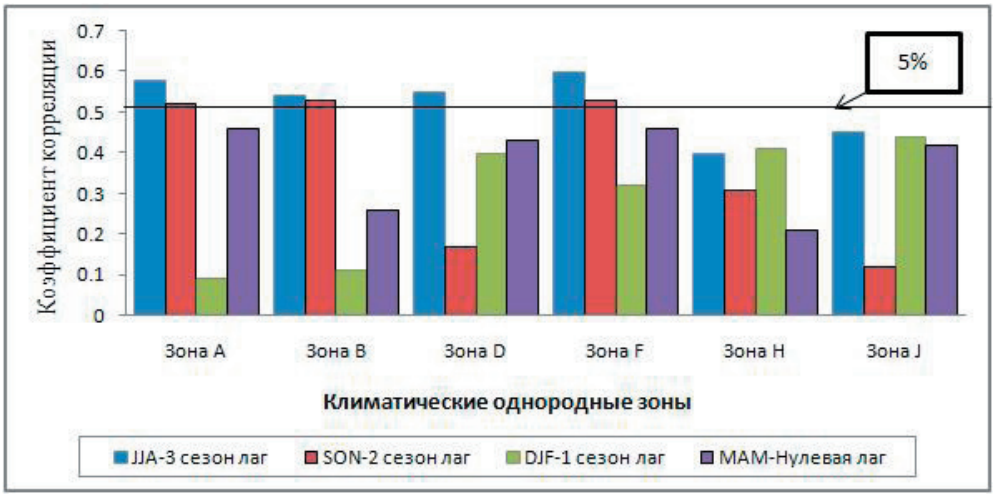


Рис. 2. Средние корреляции образцов, трех сезонов лаг, двух сезонов лаг, одного сезона лаг и нулевая лаг между индексом КДЦ и сезоном дождей по Восточной Африке с марта по май (для коэффициента корреляции выше 5% уровень значимости обозначен)

В табл. 1 приводится обобщение сезонных и ежемесячных индексов корреляции между этими двумя переменными. Результаты показывают значительную нулевую и лаг-корреляцию между КДЦ-индексом и осадками в зоне F, включающую регион вокруг озера Виктории (+0,6), южную часть Танзании (зону A) приблизительно + 0,6, западную часть Танзании (зону D) приблизительно + 0,6, центральную часть Танзании (зону B), восточную, центральную и западную Уганду (зону J) и центральные зоны разломов и область Найроби (зона H).

КДЦ/осадки корреляции в этих зонах значительно высоки в течение по крайней мере пяти месяцев до сезона дождей с марта по май. Самая высокая значительная корреляция между сезонными осадками и КДЦ-индексом составляет + 0,6, наблюдается между MAM индексом осадков и JJA КДЦ-индексом предыдущего года и уменьшается к относительно целевому сезону дождей MAM.

Эти лаг-отношения между двумя переменными показывают высокие перспективы использования их в развитии методологии предсказания. Однако корреляции внезапно разрушаются между 3 и 2 лагами сезонов для зон D, H и J. Внезапный крах в корреляциях предполагает, что долгосрочное прогнозирование (двух сезонов или заранее), невозможно выполнить в этих трех зонах. JJA КДЦ-индекс предыдущего года может использоваться для прогнозирования MAM сезона дождей с значительным результатом. Наблюдаемые области значительных лаг-корреляций предполагают, что сезонная предсказуемость в тех

областях практически возможна. Была вычислена кросс-корреляция между КДЦ-индексом, осадками и индексом Южного Колебания (SOI), полученные индексы представлены в табл. 2. Эти результаты показывают хорошую связь между КДЦ-индексом и региональными осадками со значительным нулевым и лаг-корреляциями +0,5 (приблизительно 25 %-ная дисперсия) и +0,6 (приблизительно 36 %-ная дисперсия) соответственно. Факт, что два индекса планетарного климата (КДЦ и Южного колебания) статистически не связаны в нулевом и лаг-времени, вселяет большее доверие в использовании их как предикторов для прогнозирования сезона дождей.

Таблица 1

Нулевая и лаг-коэффициент корреляции (*r*) между усредненными экваториальными стратосферными зональными ветрами на 30 мб (индекс КДЦ) и сезоном дождей с марта по май по 11 однородным зонам по Восточной Африке (объеме выборки 25 лет)

Период	Зона A	Зона B	Зона C	Зона D	Зона E	Зона F	Зона G	Зона H	Зона I	Зона J	Зона K
JJA	0,58**	0,54**	-0,42*	0,55**	0,11	0,60**	0,32	0,40*	0,41*	0,45*	0,20
SON	0,52**	0,53**	-0,34	0,17	-0,19	0,53**	0,35	0,41*	0,26	0,12	0,09
DJF	0,09	0,11	-0,15	0,40*	0,45*	0,32	0,33	0,31	0,28	0,44*	0,25
MAM	0,46*	0,26	-0,21	0,43*	0,41*	0,46*	0,20	0,21	0,35	0,42*	0,23
JUNE	-0,04	0,47*	-0,34	0,40*	0,16	0,56**	0,23	0,41*	0,40*	0,43*	0,20
JULY	-0,50*	0,54**	-0,43*	0,46*	0,13	0,59**	0,33	0,40*	0,41*	0,40*	0,19
AUG	-0,49*	0,57**	-0,41*	0,37	0,03	0,57**	0,38	0,42*	0,36	0,29	0,18
SEPT	-0,39	0,55**	-0,38	0,26	-0,08	0,55**	0,38	0,42*	0,30	0,19	0,13
OKT	-0,51**	0,52**	-0,35	0,17	-0,19	0,52**	0,35	0,43*	0,26	0,13	0,10
NOV	-0,55**	0,50*	-0,29	0,07	-0,29	0,46*	0,31	0,40*	0,20	0,05	0,03
DEC	-0,51**	0,44*	-0,25	0,02	-0,35	0,32	0,20	0,41*	0,12	-0,02	-0,04
JAN	0,39	-0,20	0,04	0,27	0,52**	0,23	0,17	0,03	0,09	0,40*	0,17
FEB	0,36	-0,09	0,02	0,31	0,53**	0,29	0,15	0,12	0,18	0,31	0,29
MAR	0,18	0,08	-0,08	0,40*	0,48*	0,38	0,16	0,16	0,28	0,47*	0,26
APR	-0,04	0,20	-0,23	0,43*	0,44*	0,46*	0,19	0,21	0,35	0,44*	0,24
MAY	-0,27	0,35	-0,29	0,40*	0,30	0,51**	0,22	0,42*	0,38	0,32	0,18

Примечания: ** 99%-ный уровень значимости, * 95%-ный уровень значимости.

Таблица 2

Нулевая и лаг-кросс-корреляции матрицы для осадков, КДЦ и индекса Южного Колебания (SOI) за период 1979–2003 гг.

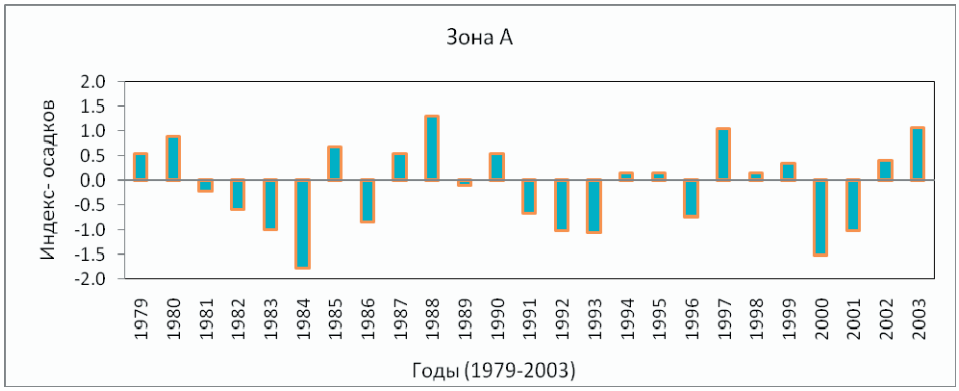
	Индекс осадков Зон F	КДЦ-индекс (МАМ)	SOI-индекс (МАМ)	КДЦ-индекс (бюль)
КДЦ-индекс (МАМ)	0,46*			
SOI -индекс (МАМ)	-0,15	0,15		
КДЦ-индекс (июль)	0,59**	0,78**	0,10	
SOI -индекс (июль)	0,07	0,21	0,44*	-0,04

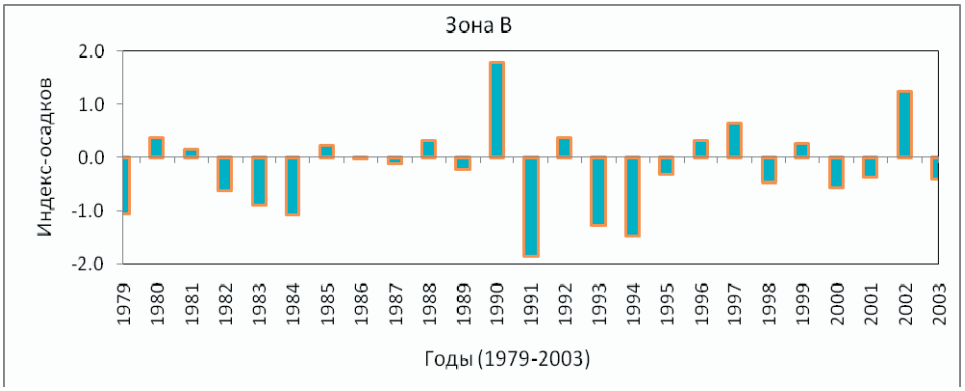
Примечания: ** 99%-ный уровень значимости; * 95%-ный уровень значимости.

3.2. Потенциал предсказуемости сезона дождей с использованием КДЦ-индекса

Рис. 3 показывает временной ряд КДЦ-индекса и индекса Южного Колебания (SOI) за период с 1979 по 2003 г., годы с западными и восточными фазами КДЦ-индекса и индекса Южного Колебания. Западные фазы КДЦ-индекса наблюдались в течение 1980, 1983, 1985, 1986, 1988, 1990, 1993, 1995, 1997, 1999 и 2002 гг.; восточные фазы в течение 1979, 1982, 1984, 1987, 1989, 1992, 1994, 1996, 1998, 2000, 2001 и 2003 гг. Эти наблюдения совпадают с таковыми из Мукерджи [9], использующего зональные данные ветра на 30 мб из Бальбоа (9 °N, 80 °W), Огалло и др. [16], использующих зональные компоненты ветра для Найроби, Кении (1 ° 18 ′S, 36 ° 45 ′E). С другой стороны, частые отрицательные фазы были доминирующими с индексом Южного Колебания в анализируемом периоде. В течение 1982, 1984, 1987, 1992, 1994, 1998 и 2003 гг. восточные фазы КДЦ-индекса совпали с низкими (отрицательными) фазами индекса Южного Колебания. Все эти годы, за исключением 1984 и 1994, были классифицированы как годы ЭНЮК [21]. Это наблюдение объясняется тем, что ЭНЮК имеет тенденцию, связанную с восточными фазами КДЦ.

Рис. 3. Средний ежегодный временной ряд для КДЦ-индекса (*а*) и индекса Южного Колебания (SOI) (*б*)





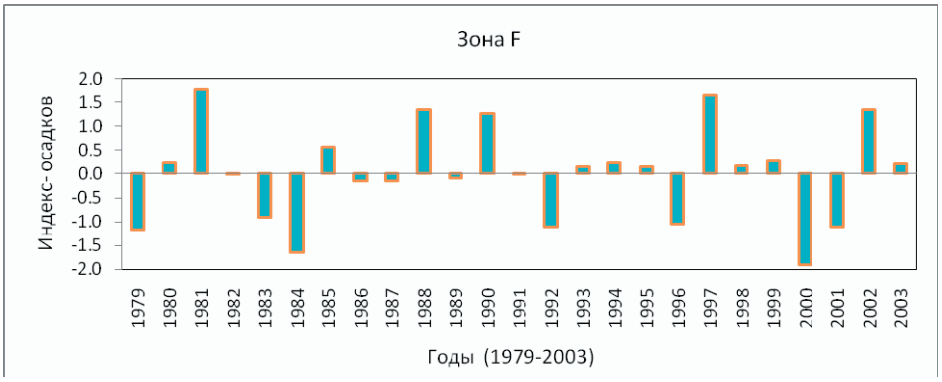


Рис. 4. Стандартизированный временной ряд осадков для трех однородных зон: зона A (южная часть Танзании), зона B (центральная часть Танзании), зона F (регион вокруг озера Виктория)

Рис. 4 показывает временной ряд осадков от трех однородных зон Восточной Африки, которые мы идентифицировали как имеющие значительную корреляцию с КДЦ-индексом. Обобщения сезонных дождей в этих трех зонах в категории с использованием таблиц сопряжённости (западные и восточные фазы КДЦ кратко излагаются в табл. 3).

Таблица 3

Таблица сопряжённости для зональных фаз ветра на уровне 30 мб и аномалий сезона дождей с марта по май в трех однородных зонах над Восточной Африкой

Зона	Фаза КДЦ-индекса	Аномалии количества осадков			
		AN	NN	BN	Сумма
Зона A	Западная фаза				
	Восточная фаза	3	1	8	12
	Сумма	10	3	10	23
Зона B	Западная фаза	7	1	3	11
	Восточная фаза	3	2	7	12
	Сумма	10	3	10	23
Зона F	Западная фаза	8	1	2	11
	Восточная фаза	2	2	8	12
	Сумма	10	3	10	23

Примечания: AN – осадки выше нормы ($X_i \geq X_{\text{средний}} + 0{,}12\ \sigma$); BN – осадки ниже нормы ($X_i \leq X_{\text{средний}} - 0{,}12\sigma$); NN – осадки около нормы ($X_{\text{средний}} - 0{,}12\sigma \leq X_i \leq X_{\text{средний}} + 0{,}12\ \sigma$); σ – стандартное отклонение; X_i означает наблюдения.

Основанные на этих трех зонах стратосферные западные фазы ветра соответствуют осадкам выше нормы, которые наблюдались в 7 из 11 случаев для зоны A, в 7 из 11 для зоны B и в 8 из 11 для зоны F, условные вероятности приблизительно 0,6; 0,6 и 0,7 для соотношений осадков выше нормы в течение сезона продолжительных дождей над экваториальным восточным африканским регионом и западной фазой КДЦ. Осадки ниже нормы, совпадающие с западной фазой КДЦ, наблюдались в 1983 г. в течение анализируемого периода. Этот год был классифицирован как удлиненный год ЭНЮК [21].

Стратосферные восточные фазы ветра и осадки ниже нормы наблюдались в 8 из 12 случаев для зоны A, в 7 из 12 для зоны B, и в 8 из 12 для зоны F, условные вероятности приблизительно 0,7; 0,6 и 0,7 для осадков ниже нормы в этих трех зонах и восточной фазе стратосферного зонального ветра.

Результаты, полученные в этом исследовании, поддерживают понятие осадков выше/ниже нормы, связанное со стратосферным западным/восточным зональным фазами ветра. Приблизительно 70 % вероятности наблюдается между западной фазой КДЦ и осадками над Восточной Африкой. Отношения терпят неудачу в течение лет сильных событий ЭНЮК. Эти хорошие связи между фазами КДЦ и сезонами осадков показывают надежный потенциал для предсказуемости осадков с использованием информацией о фазах КДЦ. Значительные корреляции между осадками в зонах A, B и F и КДЦ-индексом сохраняется в течение двух сезонов до сезона продолжительных дождей, но разрушается в зонах D, H и J. В остальной части исследования мы используем индекс осадков для зоны F как пример для проверки потенциала предсказуемости сезона дождей с использованием КДЦ-индексом.

На рис. 5 представлен временной ряд осадков по региону вокруг озера Виктория (зона F) и КДЦ-индекса в июле предыдущего года. Из рисунка видно, что приблизительно 70 % больших положительных/отрицательных аномалий осад-

ков наблюдались во время периода большого положительного/отрицательного КДЦ-индекса. Некоторые из экстремумов аномалий осадков не были связаны с КДЦ-индексом. Коэффициент корреляции между КДЦ-индексом и подрегионными осадками был равен 0,59, является 99%-ным уровнем значимости, основанным на критерии Стьюдента. Эта значительная корреляция показывает некоторые надежные связи между сезонами дождей и КДЦ. Надежные отношения между сезоном продолжительных дождей и КДЦ-индексом показывают высоко прогнозирующий потенциал. Для целей прогнозирования региональных осадков наиболее полезным индексом представляется тенденция индекса КДЦ перед сезоном дождей. Положительные тенденции – это разность между значениями с октября по декабрь (OND) и JJA индекса КДЦ, она может быть хорошим индикатором для ненаступления засухи в Восточной Африке. Кроме того, негативная тенденция может быть хорошим индикатором для ненаступления сильных дождей над регионом.

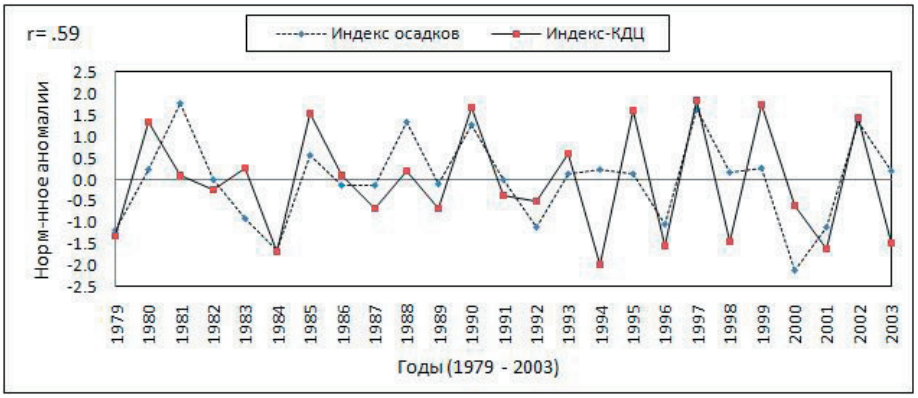


Рис. 5. Временной ряд осадков по региону вокруг озера Виктория (зона F) и КДЦ-индекса в июле предыдущего года

На рис. 6 показана диаграмма рассеяния (разброса) в период с марта по май сезона дождей по региону вокруг озера Виктория и экваториальным зональным ветром на 30 мб за июль (*а*) и тенденция – разность между значениями с октября по декабрь и периодом с июня по август КДЦ индекса (*б*). Коэффициент корреляции между аномалиями осадков над Восточной Африкой в зоне F и разница между OND и JJA КДЦ индекса представляет собой +0,63 (приблизительно 40%-ная дисперсия), который является выше, чем для JJA сезона дождей (+0,6). Как показано на рис. 6, большинство лет сильных засух находится в более низком левом секторе, а большинство лет очень сильных осадков находится в верхнем правом секторе диаграммы рассеяния (разброса). Близкое отсутствие пунктов в более низком правом углу этой диаграммы рассеяния предполагает, что положительная тенденция КДЦ индекса была хорошим предиктором для невозникновения засухи по экваториальной Восточной Африке.

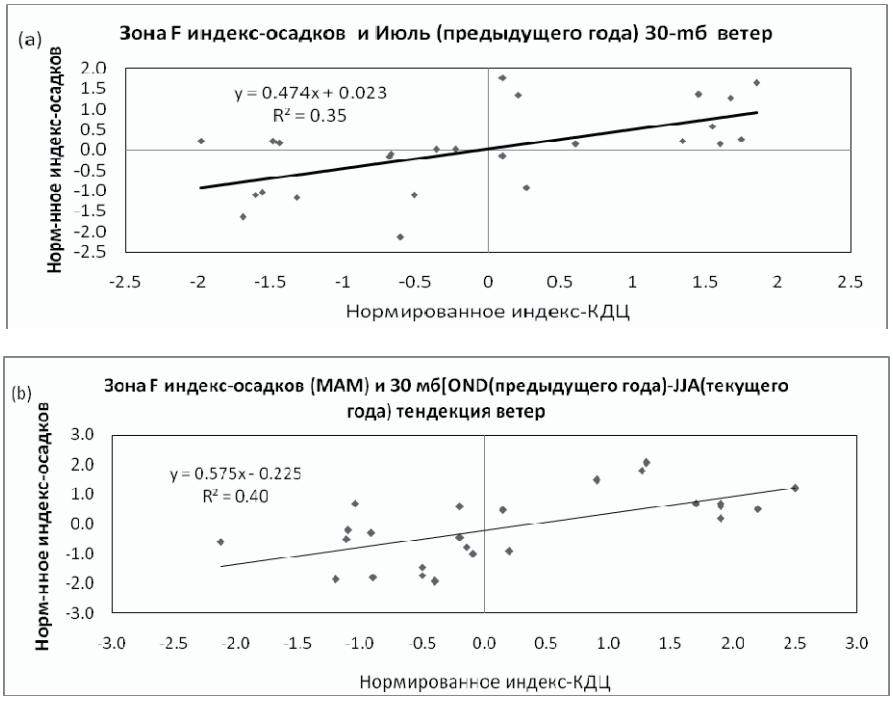


Рис. 6. Диаграмма рассеяния между сезоном дождей MAM по региону вокруг озера Виктория и экваториальным зональным ветром на 30 мб за июль (*a*), и тенденция-разность между значениями с октября по декабрь и периодом с июня по август КДЦ индекса (*b*)

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Анализ исследования отношений между различными фазами КДЦ для стратосферного зонального ветра и длительности сезона продолжительных дождей Экваториальной Восточной Африки позволяет сделать следующие выводы:

- отношения между сезонами дождей в марте-мае и эль-Ниньо относятся к ограниченному числу лет, когда эль-Ниньо происходит, тогда отношения между КДЦ-индексом и сезонами дождей применимы во всех годах. Поэтому мониторинг обоих параметров может обеспечить очень полезное руководство для долгосрочного прогноза сезона дождей по региону;
- выделение этих областей, являющиеся очень важными для сельскохозяйственного производства при сезонном прогнозе климата, были бы шагом к улучшению перспективного проектирования в промышленности;
- чтобы улучшить прогнозирование сезона дождей в марте-мае в восточно-африканских странах, которое оказывает существенное влияние на все секторы экономики, включая сельское хозяйство, водоснабжение и выработку электроэнергии, и занимает большую часть региона, можно рекомендовать использовать КДЦ-индекс как предиктор.

Литература

1. *Beltrando G.,* 1990: Space-time variability in April and October-November over East Africa during the period 1932-1983. J. Climatol., 10, 691-702.
2. *Hasebe F.,* 1980: A global analysis of the fluctuation of total ozone-II; Non-stationary annual oscillation, quasi-biennial oscillation and long-term variations in total ozone. J. Met. Soc. Japan. 58, 104-117.
3. *Holton J.R. and R.S. Lindzen,* 1972: An updated theory for the quasi-biennial cycle of the tropical stratosphere. J. Atmos. Sci. 29. 1076-1080.
4. *Holton J. R. and H.C. Tan,* 1980: The influence of equatorial quasi-biennial oscillation on the global circulation at 50 mb. J. Atmos. Sci. 37, 2200-2208.
5. *July M.R., Mc Queen C. and K. Levey,* 1994: SOI and QBO signals in the African region. Theor. Appl. Climatol. 50, 103-115.
6. *Lau K. and P.J. Sheu,* 1988: Annual cycle, Quasi-Biennial Oscillation and Southern Oscillation in global precipitation. J. Geophy. Res. 93, No. D9, 10975-10988.
7. *Mason S.J. and P.D. Tyson,* 1992: The modulation of sea surface temperature and rainfall associations over southern Africa with Solar activity and Quasi-Biennial Oscillation. J. Geophy. Res. 97, No. D5, 5847-5856.
8. *Mukherjee B.K., K. Indira, R.S. Reddy and BH. V. Ramana Murty,* 1979: High-level warming, winds and Indian summer monsoon. Mon. Wea. Rev. 107, 1581-1588.
9. *Mukherjee B.K., K. Indira, R.S. Reddy and BH. V. Ramana Murty,* 1985: Quasi-biennial oscillation in stratospheric zonal winds and Indian summer monsoon. Mon. Wea. Rev. 113, 1421-1424.
10. *Mutai C.C., Ward M.N. and Coleman A.W., 1*998: Towards the prediction of the East Africa short rains based on sea-surface temperature-atmosphere coupling. Int. J. Climatol. 18, 975-997.
11. *Nicholson S.E.,* 1996: A review of Climate Dynamics and Climate Variability in Eastern Africa. The Limnology, Climatology and Paleoclimatology of the East African Lakes. Gordon and Breach, New York, 57pp.
12. *Nicholson S.E. and Entekhabi D.,* 1986: The quasi-periodic behavior of rainfall variability in Africa and its relationship to the Southern Oscillation. Arch., Met. Geoph. Biocl. Ser. A, 34, 311.
13. *Nicholson S.E. and B.S. Nyenzi,* 1990: Temporal and spatial variability of SSTs in the tropical Atlantic and Indian Oceans. Meteorol. Atmos. Phys., 42, 1-17.
14. *Ogallo L.J.,* 1982: Quasi-periodic patterns in the East Africa rainfall records. Kenya J. Sci. and Techn. A3, PP. 43-54.
15. *Ogallo L.J., Janowiak J.E. and Halpert M.S.,* 1988: Teleconnection between seasonal rainfall over East Africa and Global seas surface temperature anomalies. J. Met. Soc. Jpn. 66, 807-822.
16. *Ogallo L.J. R. . Okoola and D.N. Wanjohi,* 1994: Characteristics of Quasi-Biennial Oscillation over Kenya and their predictability potential for seasonal rainfall. Mausam, 45, No. 1, 57-62.
17. *Okoola R.E.,* 1998: Spatial evolution of the active patterns across the equatorial Eastern Africa region during northern hemisphere spring season using Outgoing Longwave Radiation records. Meteorol. Atmos. Phy. 66, 51-63.
18. *Plumb R.A.,* 1977: The interaction of two internal waves with the mean flow: Implications for the theory of the quasi-biennial oscillation. J. Atmos. Sci. 34, 1847-1858.
19. *Rasmusson E.M., Akrhin P.A., Chen W.Y. and J.B. Jalickee,* 1981: Biennial variations in the surface temperature over the United States as revealed by singular value decomposition. Mon. Wea. Rev. 109, pp. 587-598.
20. *Smyshlyaev S.P. and H.K. Ng'ongolo,* 2010: The predictive potential of seasonal rainfall in Equatorial East Africa. Meteorological Technology International, pp. 102-105.
21. *Trenberth K.E.,* 1997: The definition of El Niño. Bull. Amer. Meter. Soc. 78, 2771-2777.
22. *Yevjevich V.,* 1972: Probability Statistics in Hydrology Fort Collins, CO, Water Resources Publication, 302 pp.

Работа выполнена в рамках мероприятия 1.3.1 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы (государственный контракт № П2595 от 26 ноября 2009 г.) по направлению «Физика атмосферы».

В.А. Лобанов, А.Е. Шадурский

ПРИМЕНЕНИЕ ЭМПИРИКО-СТАТИСТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ И АНАЛИЗА КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

V.A. Lobanov, A.E. Shadursky

APPLICATION OF EMPIRIC-STATISTICAL METHODS FOR MODELING AND ANALYSIS OF CLIMATIC CHANGES

Рассмотрено применение методологии и методов эмпирико-статистического моделирования для анализа рядов климатических характеристик за разные интервалы времени от сотен тысяч до последних 1000 лет для палеореконструкций и для многолетних рядов инструментальных наблюдений на территории России. Показано, что результаты и выводы могут существенно варьировать в зависимости от применяемых методов и от методики получения климатических характеристик. Преимущество отдано модели ступенчатых изменений, причем эта модель статистически значима только в отдельных районах или для небольшого числа станций.

Ключевые слова: эмпирико-статистические методы, анализ временных рядов, палеореконструкции и наблюдения, изменение климата.

The application of the methodology and methods of empirical-statistical modeling is considered to analyze the series of climatic characteristics for different time intervals from hundreds of thousands of years to the last 1000 years for paleoreconstructions and time series of instrumental observations in the territory of Russia. It is shown that the results and conclusions can vary significantly depending on the methods used and the method of obtaining climatic characteristics. Preference is given to models of step changes, and this model is statistically significant only in certain areas or for a small number of stations.

Keywords: empirical and statistical methods, time series analysis, paleoreconstructions and observed data, climate change.

Состояние проблемы

Современное состояние исследований в области изменения климата можно разделить на два основных направления: физико-математические модели климата, основанные на свойствах общей циркуляции атмосферы и эмпирико-статистическое направление, связанное с анализом и моделированием временных рядов и полей по данным наблюдений. Как первое, так и второе направление имеют свои преимущества и недостатки, но в то же время взаимно дополняют друг друга. История науки о климате идет от описания и установления закономерностей во времени и по пространству, от полученных взаимосвязей между разными метеорологическими характеристиками к последующему их теоретическому обобщению в виде физико-математических моделей. Вместе с тем дальнейшее развитие математических моделей невозможно без накопления новых знаний, полученных от эмпирики. В настоящее время физико-математические модели еще далеки до совершенства и поэтому новые закономерно-

сти, полученные эмпирическим путем, определяют их дальнейший прогресс. В области эмпирического направления также необходимо дальнейшее развитие как в разработке новых эффективных методов анализа и обработки данных, так и в привлечении новой информации и данных последних лет наблюдений. Основная задача эмпирического направления – осуществлять мониторинг тех метеорологических факторов, которые приводят или могут привести к неблагоприятным и опасным природным явлениям. Современная статистика опасных природных явлений свидетельствует об их росте и все большем влиянии на жизнедеятельность отдельных стран и всей планеты. В задачу мониторинга должно входить адекватное описание временных рядов и полей без искажения их структуры с помощью выбранных моделей. Наглядным примером является применение гармонического анализа для моделирования временных рядов в гидрометеорологии, который не соответствует природе явления и "подгоняет" данные наблюдений под структуру модели.

Для эффективного стохастического моделирования гидрометеорологических процессов разработана общая методология, включающая последовательную обработку данных в трех основных измерениях: внутригодовая изменчивость, межгодовая изменчивость и пространственные обобщения. Предлагаемая методология построения такой общей динамической модели для описания пространственно-временных колебаний включает следующие основные шаги:

– обобщение информации на внутригодовом интервале времени в виде выборочных (экстремумы), обобщенных (среднемесячные, сезонные, среднегодовые) характеристик и параметров внутригодовой функции;

– разделение многолетних рядов на квазиоднородные составляющие с колебаниями разных временных масштабов и определение моделей временных рядов и их параметров для каждой квазиоднородной составляющей;

– формирование однородных районов с одинаковыми свойствами современных изменений климата на основе установленных закономерностей в индивидуальных временных рядах;

– построение пространственных моделей в однородных по климатическим изменениям районах в зависимости от установленных закономерностей;

– анализ и моделирование временных рядов параметров пространственных динамических моделей.

Методы исследований

Для построения как общей динамической модели, так и отдельных ее частей, был разработан комплекс эффективных статистических методов, включающий метод разделения внутригодовой изменчивости на климатическую и синоптическую составляющие [Дрейпер, 1973, Lobanov, 2001], методы срезки и сглаживания амплитуд циклов для выделения процессов разных временных масштабов из многолетних рядов наблюдений климатических характеристик [Лобанов, 1988, Лобанов, 1992], методы классификации и построения простран-

ственных линейных моделей [Lobanov, 1999, Лобанов, 2005]. В связи, с тем, что в настоящей работе основной акцент будет сделан на результаты исследований и полученные закономерности многолетних колебаний климатических характеристик, более подробно рассмотрим две группы методов:

– методы идентификации класса стохастической модели,

– методы разделения композиционного циклического процесса на квазиоднородные составляющие.

Проявление изменений климата в многолетних временных рядах может быть двух основных видов:

– монотонные изменения в виде тренда,

– ступенчатые изменения, характеризующие переходы от одного стационарного состояния к другому.

Эти два вида климатических изменений отражают разные физические механизмы, действующие в климатической системе Земли. Трендовые изменения имеют место в слабо инерционной системе, которая быстро откликается на внешние воздействия. Механизм ступенчатых изменений или триггерный механизм характеризует неравновесную систему, которая может компенсировать внешние воздействия до тех пор, пока они не превышают порогового значения, после чего система быстро переходит на новый, часто квазистационарный, уровень. Стационарный временной ряд может быть частным случаем существования как равновесной, так и неравновесной систем. В первом случае это проявление случайных внешних воздействий, во втором – период стабильного состояния, пока величина внешнего воздействия не превысила критического порога. Кроме того, тип изменений может зависеть и от пространственного масштаба обобщения данных. Так, глобальная температура вполне может характеризоваться монотонным трендом, так как она отображает составляющую теплового баланса всей планеты. Климатические же изменения осадков для отдельной территории больше определяются сменой типов атмосферной циркуляции, что проявляется в виде ступенчатых переходов от одного стационарного состояния (типа циркуляции) к другому.

Для количественной оценки статистической значимости монотонных изменений использовались доверительные интервалы коэффициента корреляции уравнения линейного тренда:

$$Y_i = b_1 t_i + b_0 , \qquad (1)$$

где Y_i – многолетний ряд климатической характеристики; t_i – время в годах.

Для оценки статистической значимости ступенчатых изменений во временных рядах были применены известные статистические критерии: Стьюдента для оценки стационарности средних значений и Фишера для оценки стационарности дисперсий [Рекомендации, 1984]. При оценке стационарности временной ряд разбивается на две или несколько подвыборок одинаковой или разной дли-

ны, причем границы разбиения связывались с датами предполагаемого нарушения стационарности.

Наиболее распространенным методом для описания циклических колебаний является гармонический анализ [Бокс, 1974, Вентцель, 1991, Коняев, 1973], на основе которого модель временного ряда интерпретируется в виде суммы гармонических составляющих. Сумму гармоник можно представить в виде регрессионного уравнения, например:

$$Y_i = B_1 \sin(\frac{t_i}{T_1}) + B_2 \sin(\frac{t_i}{T_2}) + ... + B_0, \qquad (2)$$

где Y_i – рассматриваемая климатическая характеристика; t_i – годы; T_1, T_2, … – периоды циклов; B_1, B_2 ,…, B_0 – коэффициенты, определяемые по МНК и связанные с амплитудой гармоник и их фазой.

Для того чтобы оценить вклад каких периодов в общую дисперсию колебаний является наибольшим, можно рассчитать функцию спектральной плотности [Гренджер, 1972]. Но с другой стороны, в уравнении (2) сочетания периодов с разными, даже не наибольшими вкладами, могут дать больший эффект при описании суммарного процесса [Дрейпер, 1973]. Очевидно, что при этом каждый из коэффициентов уравнения должен быть статистически значимым.

Вторым подходом к декомпозиции сложного процесса и выделению составляющих разных временных масштабов являются статистические методы сглаживания и фильтрации. Эти методы стараются обойти основные ограничения гармонического анализа на вид функции циклов и постоянство их периодов и амплитуд во времени. Самый простой способ выделения составляющих разных временных масштабов состоит в последовательном осреднении по времени, которое сглаживает процесс (или процессы) с периодами меньшими заданного интервала осреднения. Два других статистических метода, которые были разработаны для этой цели – это метод срезки [Лобанов, 1988, Лобанов, 1992] и метод сглаживания амплитуд циклов [Lobanov. 2001]. Методы основаны не на задаваемой аналитической модели временного ряда, а на самых общих представлениях о его структуре. К таким общим представлениям можно отнести следующие:

– временной ряд неоднороден и является композицией (или суперпозицией) процессов разных временных масштабов, что можно представить в виде уравнения с тремя основными компонентами за инструментальный период [CLIVAR, 1995]:

$$Y_{com} = Y_{\text{int}eran} + Y_{decade} + Y_{centure} + ... + B_0, \qquad (3)$$

где Y_{com} – рассматриваемая характеристика годовой дискретности; $Y_{interan}$ – составляющая межгодового временного масштаба, Y_{decade} – составляющая десятилетнего временного масштаба; $Y_{centure}$ – составляющая столетнего временного масштаба; B_0 – составляющие остальных временных масштабов (продолжительнее наибольшего из рассматриваемых, например, тысячелетнего, сотни ты-

сяч лет и т.п.), которые представляются на исследуемом интервале времени в виде постоянной величины;

– основные характеристики циклов, такие как периоды и амплитуды, для процесса каждого временного масштаба не являются постоянными во времени;

– анализировать необходимо только те флуктуации, которые существенно превышают погрешность данных.

При этом предельная погрешность (ε_{max}) может быть задана кратной точности измерений или установлена итерационным путем, если количество однородных составляющих задано априори, например, равное 3 для 100–200-летнего ряда наблюдений.

Метод срезки основан на последовательном вычитании из общего ряда данных наблюдений (Y_{com}) процессов разных временных масштабов, начиная с наименьшего – межгодового. Алгоритм метода "срезки" состоит в следующем:

– задается начальное значение предельной погрешности и количество процессов разных временных масштабов;

– в многолетнем ряду вначале выделяются все экстремумы, а затем исключаются те, последовательные разности между которыми (амплитуды циклов) меньше ε_{max};

– минимумы выделенных значимых циклов соединяются прямыми линиями и на основе линейной интерполяции определяются значения Y_{jpac} для каждого года;

– принимается, что в точках минимумов процесс наименьшего масштаба отсутствует, поэтому из ряда наблюдений вычитается кусочно-линейная составляющая, соединяющая минимумы циклов и полученная разность $Y_{inter\ j} = Y_j - Y_{jpac}$ характеризует процесс наименьшего масштаба – межгодовых колебаний;

– процедуру поиска значимых экстремумов повторяют для остатка (Y_{jpac}) и в результате "срезают" процесс следующего временного масштаба – десятилетнего ($Y_{dec\ j}$);

– если остаток далее невозможно разделить на составляющие, то он представляет собой процесс вековых изменений ($Y_{cent\ j}$), если же можно срезать и вековые колебания, то предельная погрешность (ε_{max}) увеличивается на небольшой градиент и процедура повторяется до тех пор, пока в результате "срезки" не будут получены процессы трех временных масштабов.

Алгоритм метод сглаживания амплитуд циклов аналогичен алгоритму метода срезки, но в этом методе вместо соединения точек минимумов значимых циклов соединяются точки середин ветвей подъема и спада циклов, т.е. происходит сглаживание амплитуд пульсаций.

Модельные примеры и практика применения показали, что метод "срезки" позволяет эффективно определять характеристики циклов высокочастотных составляющих, а метод сглаживания амплитуд циклов – форму низкочастотной составляющей.

Результаты анализа и полученные закономерности

Применение предлагаемой методологии и методов показано для рядов различных гидрометеорологических характеристик как в разных районах России и мира, так и для разных временных интервалов: от интервала инструментальных наблюдений в 100-–300 лет до интервалов времени в сотни тысяч лет для палеоклиматических данных.

1. Анализ 800-тысячелетней палеореконструкции

Рассмотрены результаты Европейского Проекта Ледяных Кернов Антарктиды (EPICA), содержащие информацию об изменении климата за последние 800000 лет, полученную по керну льда с глубины до 3259,7 м. На рис. 1 приведен ряд температуры воздуха, восстановленной по дейтерию в отклонениях от средней температуры за последние 1000 лет [OMACVP. 2007]. Основная особенность данных состоит в их разной дискретности, которая варьирует от нескольких десятков лет в последний период до 1 измерения в тысячу лет для раннего периода времени. Свойство разной дискретности, как следует из рис. 1, особенно существенно влияет на амплитуду 100-тысячелетних циклов, которая из-за этого является неоднородной. По условиям квазиоднородной дискретности весь временной ряд палеореконструкции был разбит на 5 квадиоднородных интервалов: 600–800 тыс. лет назад со средней дискретностью (dt) 1 измерение в 700 лет (1/700), интервал 430–600 тыс. лет с dt = 1/500, интервал 350–430 тыс. лет с dt = 1/300, интервал 130–350 тыс. лет с dt = 1/150 и последний современный интервал с с dt = 1/50. Вычисленная за последний интервал времени скорость изменения температуры воздуха за 10 лет достигала по модулю 0,3–0,4 °С или 3–4 °С за столетие. Поэтому основной вывод состоит в том, что в последние 150 тыс. лет имели место скорости изменения температуры воздуха соизмеримые со скоростью современного потепления и даже превышающие ее.

Применение методов декомпозиции также позволило получить количественную информацию о числе составляющих и характеристиках циклов. На интервале 800 тыс. лет были выделены процессы четырех масштабов: столетнего со средним периодом $T_{ср}$ = 313 лет и средней амплитудой $A_{ср}$ = 1,7 °С (за последние 150 тыс. лет), тысячелетнего с $T_{ср}$ = 4400 лет (при вариации от 2300 до 8800 лет за разные интервалы дискретности) и $A_{ср}$ = 2,0 °С, десятитысячелетнего с $T_{ср}$ = 27 500 лет (при вариации от 23 300 до 48 000) и $A_{ср}$ = 3,2 °С и стотысячелетнего масштаба с $A_{ср}$ = 10 °С (за последние 430 тыс. лет). Наибольшие амплитуды циклов составляют 3,0–3,5 °С для процесса столетнего масштаба и 4–5 °С для процессов остальные масштабов. Поэтому при наложении процессов разных временных масштабов изменения температуры в несколько градусов за столетие являются вполне характерными за почти миллионную историю климата.

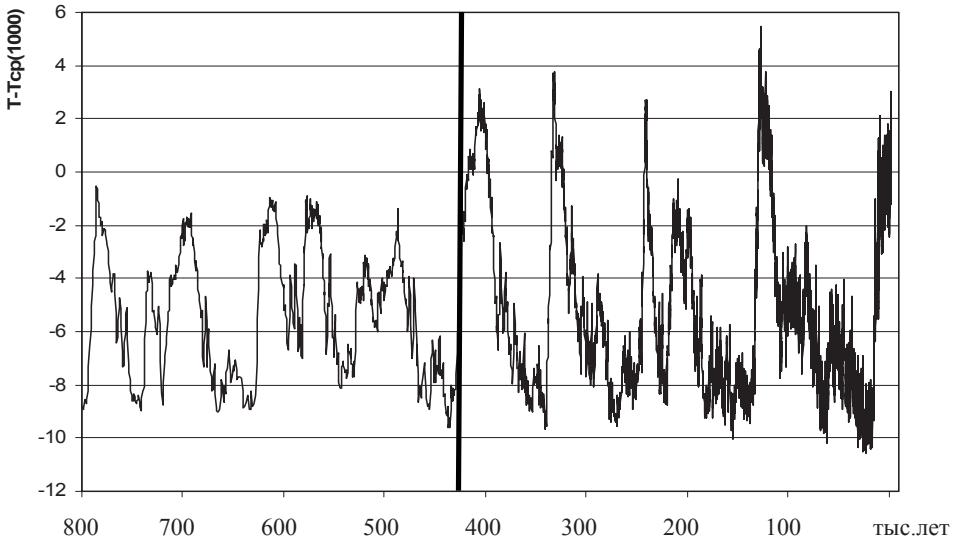


Рис. 1. “Изотопная” температура воздуха, восстановленная за период 801662 года

2. Анализ температуры за последние 45 тыс. лет

Хронологический график палеореконструкции температуры, полученный также в рамках проекта EPICA, приведен на рис. 2. Рассматриваемый интервал времени включает два квазиоднородных периода, как по дискретности данных, так и по температурному режиму. Первый интервал от 17 до 45 тыс. лет имеет среднюю дискретность 1 измерение в 45 лет и включает окончание последнего ледникового периода. Далее следует переход к голоцену, который начался приметно 12 тыс. лет назад и здесь дискретность наблюдений составляет уже 1 измерение в 10–20 лет.

Для каждого квазиоднородного периода осуществлена декомпозиция ряда двумя методами (срезки и сглаживанием амплитуд циклов) и выделены процессы столетнего и тысячелетнего масштабов. Для процесса тысячелетнего масштаба и для периода позднеледниковья $T_{ср} = 1330$ лет и $A_{ср} = 0{,}9$ °С, для периода голоцена $T_{ср} = 1010$ лет и $A_{ср} = 1{,}3$ °С. Для процесса столетнего масштаба в позднеледниковье $T_{ср} = 203$ лет и $A_{ср} = 1{,}0$ °С, а в современный период $T_{ср} = 96$ лет и $A_{ср} = 1{,}5$ °С. Из-за большей частоты измерений данные последнего периода более надежны, особенно при определении амплитуд циклов. Поэтому можно сделать, что полученные различия параметров циклов позледниковья и голоцена обусловлены разной дискретностью данных, а амплитуды циклов процессов столетнего и тысячелетнего масштабов практически одинаковы и их наложение приводит к изменению температуры 2–3 °С за столетие.

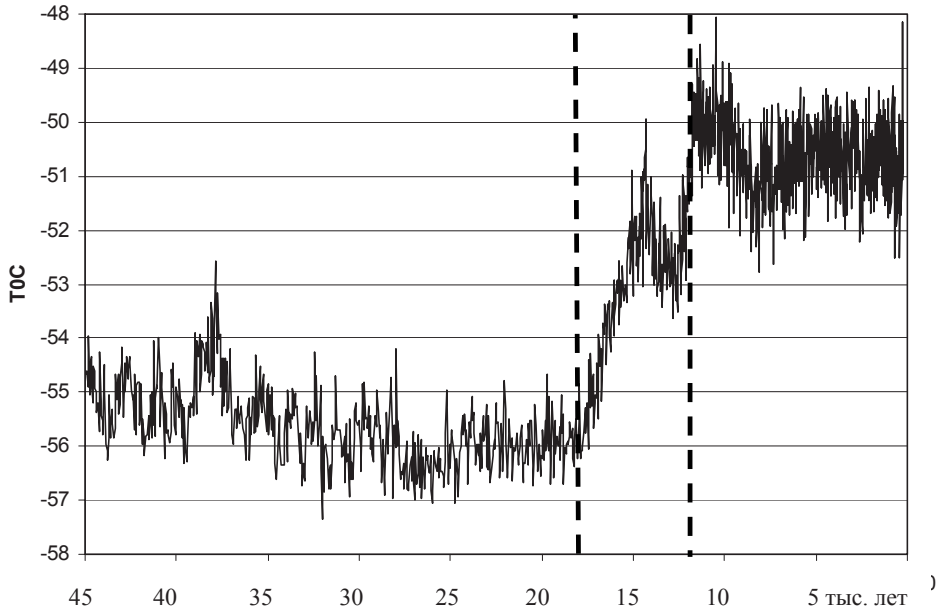


Рис. 2. Реконструкция температуры воздуха (Антарктика) за последние 45 000 лет

3. Изменение глобальной температуры за последние 1000–1300 лет

Рассматривались ежегодные данные 6 различных палеореконструкций аномалий температуры Северного полушария (от нормы 1961–1990 гг.), полученные разными авторами (Jones, 1998; Mann et al., 1999; Briffa, 2000; Crowley & Lowery, 2000, etc), по материковым индикаторам (керны, дендроинформация и т.д.) для диапазона широт 20–90 ° [CLNHTRS, 2000, Esper, 2002]. Прежде всего, была проведена оценка связанности разных палеореконструкций и получено, что коэффициенты парной корреляции невысоки и варьируют от R = 0,35 до R = 0,69. Кроме того, палеореконструкции недостаточно тесно связаны с температурой воздуха Северного полушария, вычисленной по стационарным наблюдениям за последний 150-летний период: R = 0,52–0,57 для дендрореконструкций. Поэтому все сравнения можно проводить только на уровне обобщенных показателей временных рядов.

В результате выполненной декомпозиции выявлены процессы трех временных масштабов: межгодового, десятилетнего и столетнего, а также части двух циклов процесса тысячелетнего масштаба. В процессе обобщения информации по характеристикам циклов установлено, что 4 палеореконструкции дают близкие результаты, а две (Jones и Crowley & Lowery) существенно отличатся от остальных, причем в разные стороны от общих средних показателей. По четырем палеореконструкциями получены следующие средние периоды и амплиту-

ды: $T_{ср}$ = 4 года и $A_{ср}$ = 0,16–0,26 ^{0}C для процесса межгодовой климатической изменчивости, $T_{ср}$ = 24–28 лет и $A_{ср}$ = 0,15–0,27 °C для процесса десятилетней изменчивости и $T_{ср}$ = 140–190 лет и $A_{ср}$ = 0,20–0,21 °C для процесса столетнего масштаба. При этом наибольшие амплитуды циклов составили 0,4-0,5 ^{0}C для процесса межгодового масштаба, 0,3–0,4 °C для десятилетнего и 0,2–0,3 °C для процесса столетнего масштаба, что подтверждает известную закономерность увеличения амплитуды колебаний при переходе от низкочастотной области спектра к высокочастотной. Изменение периодов и амплитуд циклов во времени для процессов межгодовой и десятилетней климатической изменчивости имело практически случайный характер, как следует, например, из рис. 3, на котором приведен хронологический ряд амплитуд циклов процесса межгодовой изменчивости.

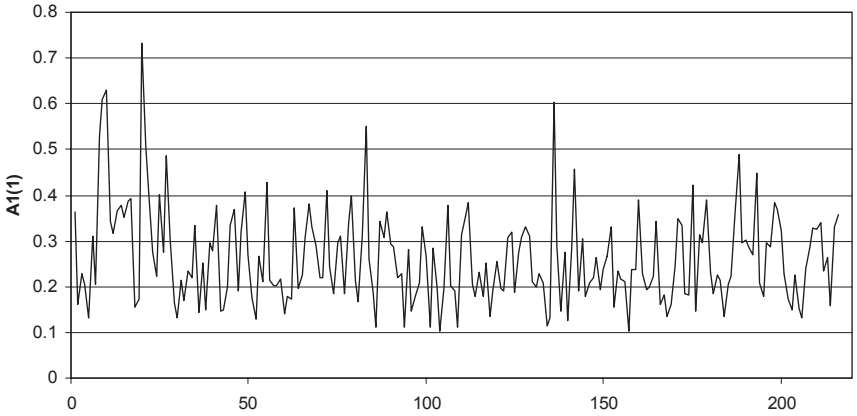


Рис. 3. Хронологический ряд амплитуд циклов процесса межгодового масштаба

4. Наиболее продолжительные ряды инструментальных наблюдений

Начало инструментальных наблюдений связано с изобретением первых метеорологических приборов: термометра (1610 г.), барометра, дождемера. Первое зарегистрированное метеорологическое наблюдение относится к 1607 г., однако регулярные наблюдения на отдельных станциях начались с конца XVII – начала XVIII вв.: с 1697 г. – Кью Гарденс (Великобритания), с 1706 г. – Билт (Нидерланды), с 1744 г. – Санкт-Петербург (Россия), с 1753 г. – Женева (Швейцария), с 1757 г. – Париж (Франция). Несмотря на то, что за столь продолжительный период изменялась методика наблюдений и сами приборы, на основе анализа наиболее продолжительных рядов наблюдений можно сделать вывод, что современные максимумы температуры не являются аномалиями, а аналогичные имели место и в прошлом. В качестве примера на рис. 4 показано как современное повышение температуры, так и предыдущее в начале – середине XIX в.

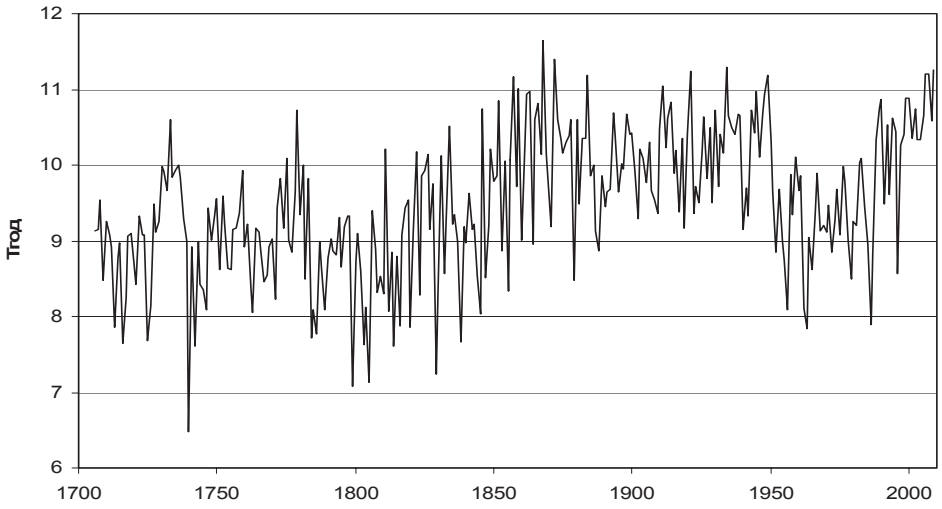


Рис. 4. Среднегодовая температура воздуха на станции Билт (Нидерланды)

Помимо того, что при оценке “аномальности” современных экстремумов необходимо использовать предыдущие данные, вторая основная особенность в получаемых выводах определяется применяемыми методами обработки или “инструментами” (tools). На примере продолжительного ряда средних температур воздуха января в Санкт-Петербурге (1744–2009 гг.) рассмотрим результаты применения различных методов моделирования временного ряда, включая: стационарное среднее, линейный тренд, спектральный анализ, методы декомпозиции и выделения циркуляционных эпох. На рис. 5 приведена аппроксимация временного ряда моделью линейного тренда с коэффициентом корреляции R = 0,32, который является статистически значимым при объеме выборки в 254 года и средней скорости роста температуры 1,8 °С за 100 лет. Вместе с тем отношение дисперсии многолетних колебаний к остаточной дисперсии относительно линейного тренда равное 1,12 не является статистически значимым и свидетельствует о том, что модель тренда статистически не отличается от модели случайной выборки, а в терминах стандартного отклонения модель тренда уменьшает естественную вариацию только на 5 %.

Следующая модель представляет собой аппроксимацию временного ряда суммой гармоник с разными периодами, предварительный отбор которых был осуществлен на основе автокорреляционной функции и включал 31 гармонику с периодами в диапазоне от 2 до 120 лет. В результате получено уравнение, включающее только 5 статистически значимых гармоник с периодами 24, 27, 28, 29 и 30 лет:

$$T_i = 0{,}25\sin(2\pi i/24) + 0{,}63\sin(2\pi i/27) - 1{,}02\sin(2\pi i/28) + \\ + 0{,}84\sin(2\pi i/29) - 0{,}48\sin(2\pi i/30) \text{ с } R = 0{,}37. \quad (4)$$

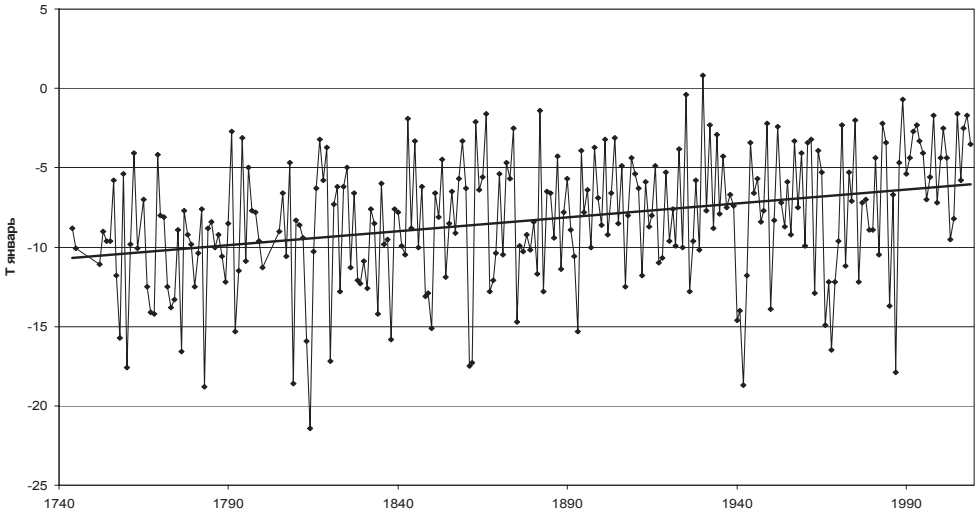


Рис. 5. Ряд среднемесячных температур воздуха января и его аппроксимация трендом (г. Санкт-Петербург)

Коэффициент множественной корреляции уравнения (4) R = 0,37 ненамного отличается от R = 0,32 в модели линейного тренда, а сама модель гармоник статистически значимо не отличается от модели случайной выборки.

Применение двух методов декомпозиции дало одинаковые результаты: выделены процессы трех временных масштабов: межгодового, десятилетнего и столетнего. Причем средний период циклов процесса межгодовой изменчивости составлял 4 года при вариации от 2 до 11 лет, а средний период процесса десятилетнего масштаба составлял 28 лет при вариации от 13 до 53 лет, т.е. спектральные диапазоны процессов двух соседних масштабов не перекрываются. Каких-либо закономерностей во временных рядах периодов и амплитуд циклов процессов этих масштабов не установлено. Единственно, что наблюдается практически “ступенчатый” переход в росте температуры в 1820–1830-х годах для процесса столетнего масштаба. Если сравнить среднюю многолетнюю температуру с начала наблюдений по 1828 г. и за второй интервал времени по 2009 г., то эти средние будут иметь статистически значимое различие по критерию Стьюдента даже при уровне значимости $\alpha = 1$ %. Установленная неоднородность ряда наблюдений, видимо связана с переносом станции, так как с 1835 г. наблюдения проводились в горном институте на Васильевском острове.

Если рассматривать изменение температуры воздуха с учетом эпох атмосферной циркуляции, то некоторые соседние интервалы времени будут иметь статистически значимые отличия в средних и дисперсиях, а другие нет. Так, например, период 1940–1987 гг. имеет большую дисперсию и меньшую среднюю температуру, чем последующий период 1988–2009 гг., что установлено по

критериям Фишера и Стьюдента при $\alpha = 1$ %. В тоже время, предыдущий период 1920–1939 гг., хотя также и является более теплым, но по параметрам статистически не отличается от периода 1940–1987 гг.

Поэтому циркуляционные эпохи отображают цикличность процесса десятилетнего масштаба, разница состоит лишь в том, что при переходе от одних температурных условий к другим принимается или монотонность (циклы) или ступенчатость изменений (эпохи атмосферной циркуляции). Если в этом же многолетнем ряду отдельно рассматривать наибольшие экстремумы циклов, сформированные теплыми воздушными массами. И наименьшие, сформированные приходом холодных воздушных масс, то единственная неоднородность будет иметь место также в 1830-х годах, после чего ряды наибольших и наименьших экстремумов циклов становятся стационарными. Также можно отметить, что подобная неоднородность обусловила вероятно и значимость линейного тренда повышения температуры, наравне с последним периодом (1988–2009 гг.) относительно высоких температур при средней значении –4,2 °С января. Вместе с тем, средняя температура января в 2010 г. составила –12,1 °С, что свидетельствует или о завершении периода теплых температур января или, по крайней мере, статистическая значимость последнего теплого периода как аномального существенно уменьшится. Также, если найти температурный тренд за период 1935–2010 гг., то его коэффициент корреляции $R = 0{,}21$, т.е. будет уже в 1,5 раза меньше.

5. Изменение температуры воздуха и осадков на территории России

Рост глобальной приземной температуры воздуха на последнее столетие практически ни у кого не вызывает сомнения, особенно за период 1980-2000 гг., хотя много вопросов вызывает физический смысл этой величины и методика ее определения. Применение методов декомпозиции позволило установить стационарность периодов и амплитуд циклов процесса межгодовой изменчивости, а также циклические закономерности в колебаниях амплитуд циклов процесса десятилетней климатической изменчивости на фоне ветви подъема процесса столетнего масштаба, начиная с 1920-х годов. В то же время, много больший интерес, чем глобальная температура, представляет проблема изменения климатических характеристик на территории России. В работе [Анисимов, 2007] показано, что из 22 выделенных однородных районов модель ступенчатых изменений средней районной температуры имеет преимущество над моделью тренда в 15 районах, а в остальных эти модели практически не различаются по величине остаточной дисперсии. Вместе с тем, статистическая значимость модели ступенчатых изменений по отношению к модели стационарной выборки имеет место только для трех районов центральной и южной части Восточной Сибири. Аналогичная территория Забайкалья с наибольшим ростом температур для России и всего мира в 1,65 °С за 100 лет установлена в исследованиях ГГО. При этом градиент роста глобальной температуры составляет 0,75 °С за 100 лет и

поэтому можно считать, что территория центра и юга Восточной Сибири вносит основной вклад в глобальное потепление.

Чтобы разобраться в феномене стремительного потепления рассматриваемого региона, были выбраны 10 наиболее продолжительных рядов наблюдений за среднемесячной температурой воздуха по 2009 г. включительно из базы данных Королевского метеорологического института Нидерландов (The Royal Netherlands Meteorological Institute) [KNMI, 2009], которые используются при определении глобальной температуры. Выбраны следующие метеостанции (при расположении в регионе с запада на восток и с севера на юг): Ербогачен, Киренск, Витим, Сунтар, Вилюйск, Якутск, Алдан, Оймякон, Усть-Майя, Аян. В связи с тем, что методика определения среднегодовой температуры из среднемесячных данных может быть разная, то рассматривались два варианта: определение среднегодовой температуры, если среднемесячные данные имели место не менее, чем за 9 месяцев года (пропуски наблюдений ≤ 3 месяца в году) и во втором варианте среднегодовая температура рассчитывалась, если данные были за все 12 месяцев. В многолетних рядах, полученных по первому варианту, имели существенные повышения температуры до 2–3 °С за последние 25 лет, особенно в Якутске, Оймяконе, Усть-Майя, Вилюйске, Витиме. Однако этот резкий подъем обусловлен аномально высокой среднегодовой температурой 2007 г., которая получена по данным 11 месяцев, так как среднемесячная температура декабря на всех станциях отсутствовала. Если же рассматривать временные ряды в которых среднегодовая температура получена по всем 12 месяцам, то ситуация существенно изменится. Во-первых имеет место только ступенчатый рост температуры с середины – конца 1980-х годов не для всех станций, а во-вторых, эта “ступенька” достигает 1,6–1,7 °С только в Якутске и Алдане, а на остальных станциях существенно меньше. Пример разных результатов, получаемых при разных методиках подсчета среднегодовой температуры, показан на графиках рис. 6 для Якутска.

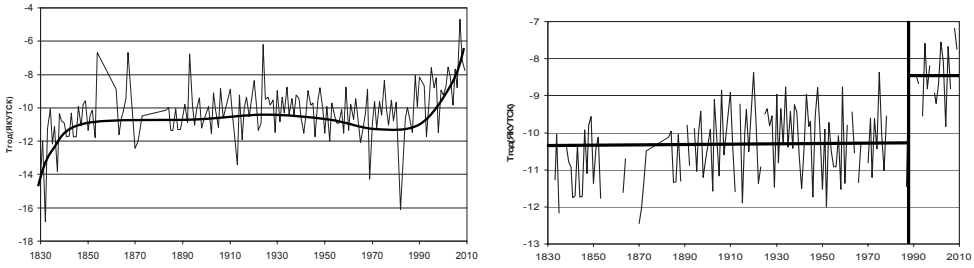


Рис. 6. Среднегодовые температуры воздуха в г. Якутске, полученные по двум вариантам

Если же принять версию, что в рассматриваемом регионе среднегодовая температура выросла ступенчато где-то 20–25 лет назад, то это может быть связано с изменением атмосферной циркуляции.

Проверка эффективности конкурирующих моделей временных рядов (стационарное среднее, линейный тренд и ступенчатые изменения) была осуществлена также для многолетних рядов температуры воздуха и осадков в отдельных регионах России. Практически во всех случаях преимущество имела модель ступенчатых изменений. Вместе с тем, статистическая эффективность этой модели по сравнению с моделью стационарного среднего имела место для небольшого числа случаев: 17 % – для рядов осадков и 4,7% для температуры воздуха на территории севера Западной Сибири; 11 % – для рядов осадков и 6,8 % для температуры воздуха на территории Северо-Запада ЕТР и всего 4,2 % – для рядов осадков и 3,1 % для температуры воздуха на территории Калининградской области. Причем, большая нестационарность в рядах осадков обусловлена сменой регистрирующих приборов в 1950–60-х годах.

Выводы

Предварительный анализ различных по продолжительности временных рядов реконструированных и наблюденных климатических характеристик позволяет сделать следующие основные выводы:

1. Почти за 1 миллион лет истории Земли имели место колебания осредненной за период в несколько сот лет температуры воздуха с амплитудой 10–15 °С за 100 тыс. лет, при этом скорость изменений часто достигала 3–4 °С за столетие, что даже превышает современное потепление;

2. По палеоданным за голоцен в последние 12 тысяч лет уже можно более надежно получить численные значения периодов и амплитуд циклов процессов разных временных масштабов. Так для процесса тысячелетнего масштаба $T_{ср}$ = 1010 лет и $A_{ср}$ = 1,3 °С, а для процесса столетнего масштаба $T_{ср}$ = 96 лет и $A_{ср}$ = 1,5 °С, что при наложении процессов приводит к изменению температуры в 2–3 °С за столетие;

3. Ежегодные реконструкции глобальной температуры за последние 1000–1300 лет позволят определить $T_{ср}$ = 4 года и $A_{ср}$ = 0,16–0,26 °С для процесса межгодовой климатической изменчивости, $T_{ср}$ = 24–28 лет и $A_{ср}$ = 0,15–0,27 °С для процесса десятилетней изменчивости и $T_{ср}$ = 140–190 лет и $A_{ср}$ = 0,20–0,21 °С для процесса столетнего масштаба. При наложении процессов это приводит к изменению в 0,5–0,6 °С за столетие, что имеет место и для современной глобальной температуры. При этом эпохи высокой температуры наблюдались10–12 вв., а низкой – в 16–18 вв. и перепады глобальной температуры между этими эпохами достигали 1,0 °С.

4. В наиболее продолжительных рядах инструментальных наблюдений за последние 250–300 лет ранее также были зафиксированы экстремальные температуры, которые или еще не были превышены современным потеплением или ненамного ниже современных.

5. На примере наиболее продолжительного ряда среднемесячных температур воздуха января в г. Санкт-Петербурге за период 254 года наблюдений пока-

зана зависимость получаемых выводов от применяемых статистических методов и результаты варьируют от случайной выборки до линейного тренда. Наиболее эффективные методы позволили установить неоднородность всего ряда наблюдений и начало однородного периода с 1835 г., а также значения средних периодов межгодовой и десятилетней климатической изменчивости в 4 года и 28 лет соответственно.

6. При анализе изменений региональной температуры воздуха на территории России приоритет отдан модели ступенчатых изменений многолетних колебаний по сравнению с моделями стационарного среднего и тренда, что характеризует эпохальные и резкие изменения в атмосферной циркуляции. При этом статистическая значимость ступенчатых изменений имеет место только для территории центра и юга Восточной Сибири. Здесь же установлена зависимость выводов от методики получения среднегодовой температуры: с учетом пропусков наблюдений или без них.

7. Предварительные исследования многолетних рядов температур воздуха и осадков на станциях в отдельных районах России оказали, что хотя модель ступенчатых изменений имеет преимущество, но статистическая значимость ее всего от 7 до 17 % от общего числа анализируемых рядов.

Литература

1. *Анисимов О.А., Лобанов В.А., Ренева С.А.* Анализ изменений температуры воздуха на территории России и эмпирический прогноз на первую четверть 21 века // Метеорология и гидрология, 2007, № 10, с. 20-30.
2. *Бокс Дж., Дженкинс Г.* Анализ временных рядов. – М.: Мир, 1974. – 406 с.
3. *Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.* Теория случайных процессов и ее инженерные приложения. – М.: Наука, 1991. – 379 с.
4. *Гренджер К., Хатанака М.* Спектральный анализ временных рядов в экономике. – М.: Статистика, 1972. – 312 с.
5. *Дрейпер Н., Смит Г.* Прикладной регрессионный анализ. – М.: Статистика, 1973. – 392 с.
6. *Коняев К.В.* Спектральный анализ случайных процессов и полей. – М.: Наука, 1973. – 168 с.
7. *Лобанов, В.А., Анисимов, О.А.* Современные изменения температуры воздуха на территории Европы // Метеорология и гидрология, 2003, № 2, 5–14.
8. *Лобанов В.А., Степаненко С.Р.* Эмпирические методы фильтрации и разделения природных процессов на разномасштабные составляющие // Тез. докл. III Всесоюзн. конф. "Перспективные методы планирования эксперимента", Гродно, 1988.
9. *Лобанов В.А., Смирнов И.А.* Декомпозиция метеорологических процессов и анализ их характеристик эмпирическими методами // Межвуз. сб. "Вопросы прогноза погоды, климата и циркуляции атмосферы". – Пермь, 1992, с. 101-108.
10. *Лобанов В.А., Анисимов О.А.* Эмпирико-статистическое моделирование временных и пространственных изменений гидрометеорологических характеристик // Труды ИНЭНКО, отд. “Наука”, 2005, с. 78-87.
11. Рекомендации по статистическим методам анализа однородности пространственно-временных колебаний речного стока. – Л.: Гидрометеоиздат, 1984. – 78 с.
12. CLIVAR. A study of climate variability and predictability. – Science Plan, WMO/TD No 690, 1995. – 157 pp.
13. Crowley and Lowery Northern Hemisphere Temperature Reconstruction Science. Vol. 289, p. 270, 14 July 2000.

14. *Esper J., Cook E.R., Schweingruber F.H.* Low-Frequency Signals in Long Tree-Ring Chronologies for Reconstructing Past Temperature Variability, Science, Volume 295, Number 5563, 22 March 2002.
15. *Lobanov V.A.* Empirical-statistic methodology and methods for modelling and forecasting of climate variability of different temporal scales. Advances in Atmospheric Sciences, 2001, vol. 18, Science Press, Bejing, China, pp. 844-863.
16. *Lobanov V.A., Lobanova H.V.* Trends in Cold Climate Characteristics in "Urban Drainage in specific climates". Cold climate. UNESCO, 1999, 35 pp.
17. Orbital and Millennial Antarctic Climate Variability over the Past 800,000 Years. Science, Vol. 317, No. 5839, pp. 793-797, 10 August 2007.
18. The Royal Netherlands Meteorological Institute. Climate Explorer. Select a monthly time series. Historical observations – Netherlands. 2009. см. http://climexp.knmi.nl/selectstation.cgi?someone.

Работа выполнена по гранту НК-546п “Геофизика” в рамках реализации ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг.

В.Н. Боков

О СВЯЗИ АТМОСФЕРНОЙ ЦИРКУЛЯЦИИ И СЕЙСМИЧНОСТИ В ДИАПАЗОНЕ СЕЗОННОЙ ИЗМЕНЧИВОСТИ

V.N. Bokov

CONNECTION BETWEEN ATMOSPHERIC CIRCULATION AND SEISMICITY IN A SEASONAL VARIABILITY RANGE

Внутригодовая изменчивость землетрясений обусловлена внутригодовой изменчивостью атмосферной циркуляции. Максимальная изменчивость атмосферной циркуляции в весенние и осенние периоды совпадает с максимальным количеством случаев сильных землетрясений и имеет статистически значимый коэффициент корреляции. Основной причиной внутригодовой изменчивости землетрясений являются сезонные смещения климатических фронтов относительно тектонических разломов от зимы к лету, и наоборот. Воздушные массы создают дополнительные нагрузки на земную кору, усиливая в ней экзогенные процессы и инициируя сейсмические явления.

Ключевые слова: сезонная, внутригодовая изменчивость, атмосферная циркуляция, землетрясения.

Interannual variability of earthquakes is caused by interannual variability of atmospheric circulation. The maximum variability of atmospheric circulation during the spring and autumn periods coincides with a maximum quantity of cases of strong earthquakes and has statistically significant factor of correlation. A principal cause of interannual variability of earthquakes is the seasonal displacement of climatic fronts around tectonic breaks from winter to the summer, and vice versa. Air mass create additional loadings on earth crust, intensifying exogenous processes in it and initiating the seismic phenomena.

Keywords: seasonal, interannual variability, of atmospheric circulation, the earthquakes.

Вопрос о существовании внутригодовой или сезонной изменчивости сильных землетрясений на сегодняшний день является дискуссионным. Ряд ученых считают, что сезонная изменчивость сильных землетрясений свойственна природным процессам [Барсуков, Шаманин, 2001; Боков, Воробьев, 2007; Гохберг и др., 1995; Дещеревский, Сидорин, 2001; Дещеревская, Сидорин, 2005; Кропоткин, Люстих, 1974; Левин, Сасорова, Журавлев, 2005], а другие отрицают ее существование [Дещеревская, Сидорин, 2005, Дещеревская, Сидорин, 2008]. Действительно, с точки зрения сейсмологии весьма сложно объяснить наличие сезонного хода землетрясений. Анализ внутригодовой изменчивости землетрясений показал, что она имеет значительные различия, как по величине размаха, так и по синфазности годового хода даже для соседних сейсмоактивных районов. С целью получения общих закономерностей сезонной изменчивости исследования проводят по крупным регионам Земли [Кропоткин, Люстих, 1974] или по глобальным данным, включающие северное, южное полушария и всю

Землю в целом [Барсуков, Шаманин, 2001; Левин, Сасорова, Журавлев, 2005]. В работе [Дещеревская, Сидорин, 2005] утверждается, что геофизические экзогенные явления в земной коре существенно зависят от сезонной изменчивости гидрометеорологических процессов. Это совпадает с научной концепцией, используемой при разработке новых методов прогноза землетрясений [Боков, 2003; Сытинский, 1987].

По мнению ряда авторов, главной причиной сезонной изменчивости землетрясений является сезонные изменения угловой скорости вращения Земли Ω(t) [Барсуков, Шаманин, 2001; Гохберг и др. 1995; Кропоткин, Люстих, 1974] или приливные явления луны и солнца [Левин, Сасорова, Журавлев, 2005]. Результаты исследований, представленные в перечисленных работах, показывают, что указанные факторы обусловливают сезонную изменчивость слабых и умеренных сейсмических явлений.

В большинстве немногочисленных работ, посвященных данной проблеме, преобладает гипотеза о влиянии сезонных изменений Ω(t). Однако, сезонная изменчивость скорости вращения Земли, как показано в работах [Вершовский, 2006; Кондратович, Куликова, Федосеева, 2001; Сидоренков, 2002], обусловлена её атмосферной циркуляцией. Следовательно, изменения Ω (t) также не являются главным фактором, влияющим на внутригодовое распределение сильных землетрясений. Это хорошо видно на рис. 1. Максимумы и минимумы внутригодового изменения угловой скорости вращения Ω (t) не совпадают с максимумами и минимумами внутригодового распределения сильных землетрясений для представленных сейсмоактивных регионов Земли.

Одним из главных факторов, инициирующих землетрясения в синоптическом диапазоне изменчивости является пространственно-временная изменчивость атмосферной циркуляции [Боков, 2003; Сытинский, 1987]. Является ли этот фактор определяющим изменчивость сильных землетрясений в сезонном диапазоне? Чтобы ответить на этот вопрос необходимо рассмотреть атмосферные преобразования, предшествующие моменту сильных землетрясений в диапазоне синоптической изменчивости, поскольку сезонная изменчивость определяется набором синоптических ситуаций.

Предполагая влияние атмосферы на сезонную изменчивость сильных землетрясений [Боков, Воробьев, 2007], убедимся на ряде сейсмически активных регионов, что сильные землетрясения определяются главным образом изменчивостью атмосферной циркуляции, свойственной данным регионам.

Для этой цели мы использовали данные Национального сейсмологического центра США [http://earthquake.usgs.gov/earthquakes], а также национальные архивы России [http://www.ceme.gsras.ru] и Греции [http://www.gein.noa.gr]. Из указанных архивов были выбраны землетрясения с $M \geq 5{,}0$, с $M \geq 6{,}0$ и с $M \geq 7{,}0$ для ряда регионов Северного полушария с 1901 по 2007 г. Данные по повторяемости атмосферных процессов по регионам Северного полушария взяты из «Атласа синоптических характеристик цикло-и антициклогенеза и цикло и ан-

тициклолиза в Северном полушарии» [Хайрулин, 1990]. Из рассмотренных в атласе четырех типов циркуляционных процессов наиболее информативными, для преобладающего числа сейсмоактивных регионов, оказались подвижные циклоны, антициклоны и процессы антициклолиза.

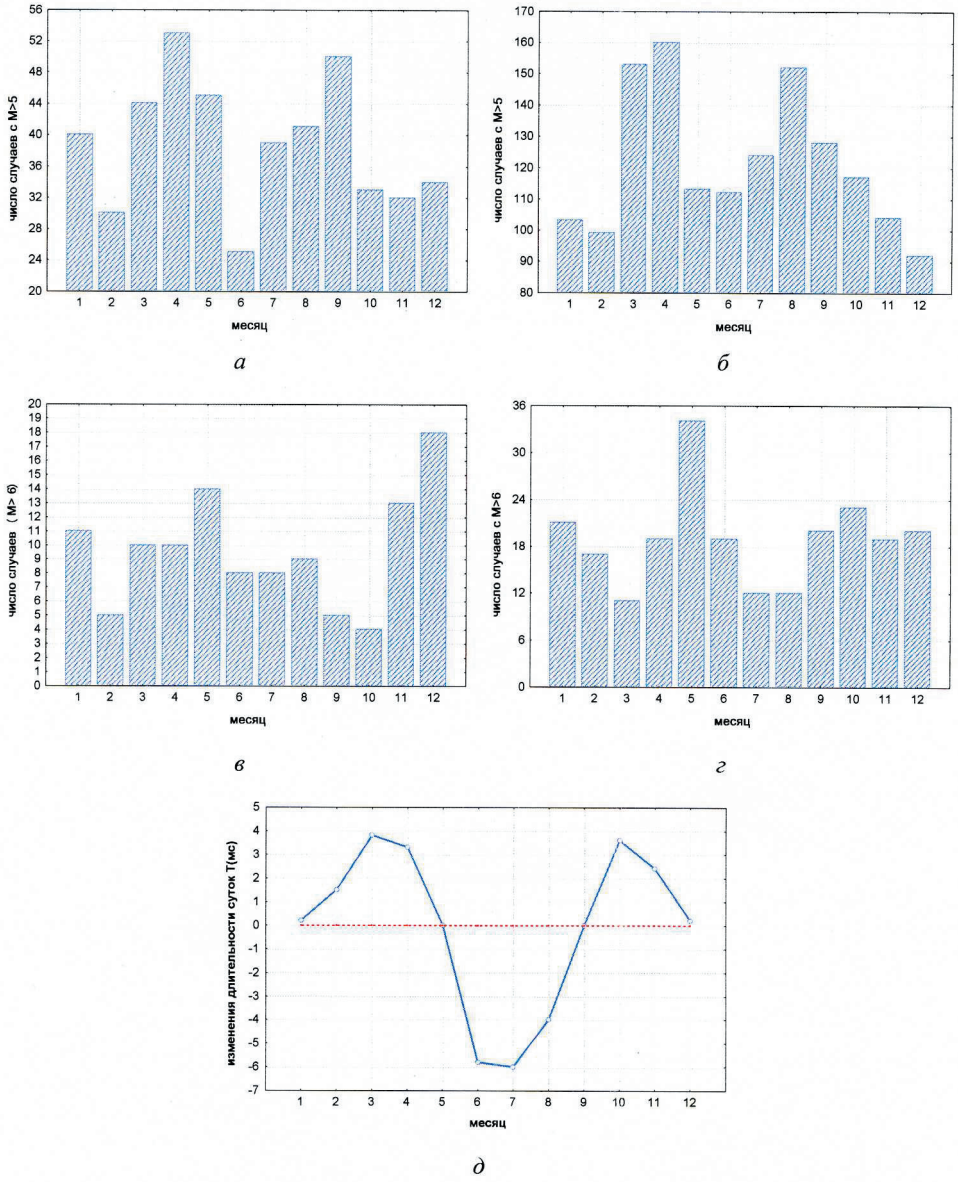


Рис. 1. Гистограммы сезонной изменчивости сильных землетрясений в различных регионах Земли и график годового хода скорости ее вращения: Турция M ≥ 5 (*а*), Греция M ≥ 5 (*б*), Камчатка M≥ 6 (*в*), Япония M≥ 6 (*г*), скорость вращения Земли (*д*)

Рассмотрим результаты исследований связей землетрясений и атмосферной циркуляции в сезонном диапазоне изменчивости для ряда регионов Северного полушария.

Район Курильских островов

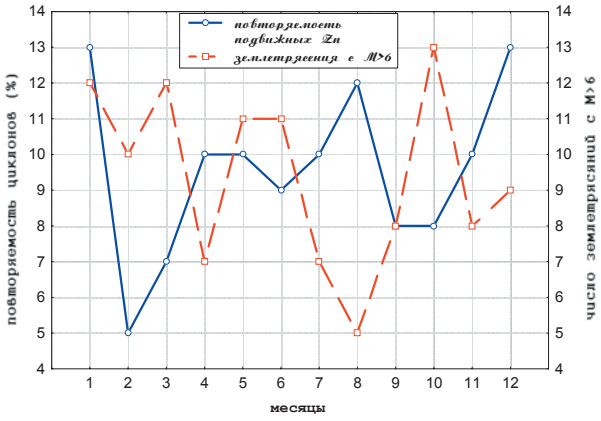
Район Курильских островов относится к наиболее сейсмически активным районам Земли. В поперечном разрезе Курильской дуги различают [Апродов, 2000]: глубоководный Курило-Камчатский желоб, подводную островодужную террасу, поднятие Малой Курильской гряды с продолжающим ее на север подводным хребтом Витязь, внутридуговой грабен между Малой и Большой Курильской грядами, горст Большой Курильской гряды, Курильскую тыловую глубоководную котловину в Охотском море.

Для района Курил характерна сильная атмосферная изменчивость, поэтому сильные землетрясения здесь инициируются в основном пространственной изменчивостью, как циклонов, так и антициклонов. Вклад в инициирование сильных землетрясений зависит от мощности атмосферного вихря и его расположения относительно эпицентра землетрясения и линии тектонического разлома [Боков, 2003].

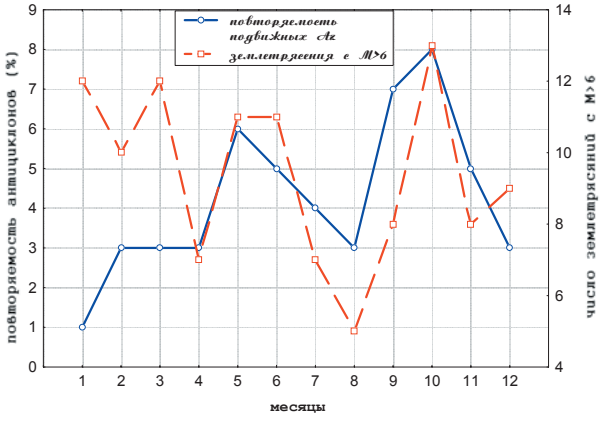
На рис. 2 представлены графики внутригодовой изменчивости землетрясений с $M \geq 6$ и подвижных циклонов (рис. 2, *а*) и антициклонов (рис. 2, *б*) над Курильскими островами. Из рисунка видно, что большая повторяемость землетрясений в январе и декабре определяются циклоническими атмосферными процессами, а в остальные месяцы года антициклональными атмосферными процессами.

Примеры характерных синоптических условий, инициирующие землетрясения в зимний период отражены на рис. 3, *а*. Подобные примеры для летнего периода отражены на рис. 3, *б*. Приведенные карты барических полей дают общее представление о характере атмосферных процессов и указанные периоды года и подчеркивают выводы, сделанные на основе рис. 2, *а, б*.

Поскольку инициирование землетрясений происходит при совместном участии, как циклонов, так и антициклонов, то попытаемся получить комбинированный внутригодовой ход повторяемости циклонов и антициклонов с учетом их вклада по месяцам. Для этого сложим повторяемости подвижных циклонов и антициклонов и сумму разделим на два. Полученный результат представлен на рис. 4, из которого видно, что сезонная изменчивость сильных землетрясений определяется сезонной изменчивостью атмосферных процессов. Особенно четко это проявляется во время весенне-осенних перестроек атмосферных процессов. Совмещение графика землетрясений и комбинированного графика циклонов и антициклонов показывают хорошую когерентность во все месяцы года, землетрясений с коэффициентом корреляции $r = 0{,}65$. При этом следует учитывать, что данный коэффициент корреляции отражает пространственно-временное обобщение информации за большой период времени и на обширном пространстве.



а



б

Рис. 2. Сезонная изменчивость сильных землетрясений с M ≥ 6 и подвижных циклонов (*а*) и подвижных антициклонов (*б*) в районе Курил

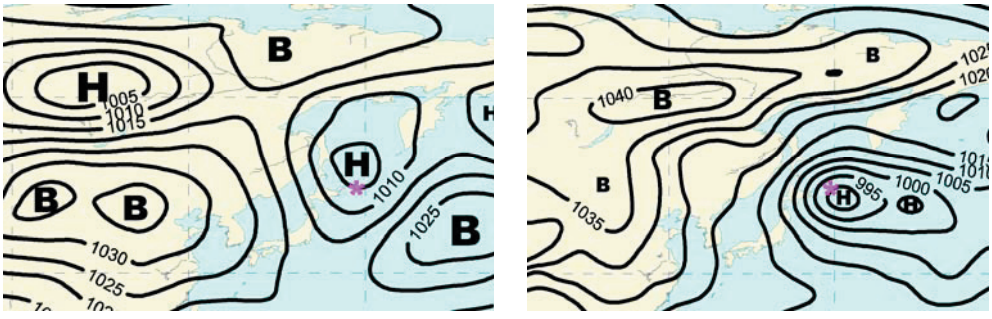


Рис. 3*а*. Землетрясения на Курильских островах в зимние месяцы:
- 7 ноября 1958 г. (44.5N, 148.5E) с M = 8,2 (верхний);
- 3 декабря 1996 г. (44.3N, 149.1E) с M = 6,8 (нижний). Знаком * отмечен эпицентр землетрясения

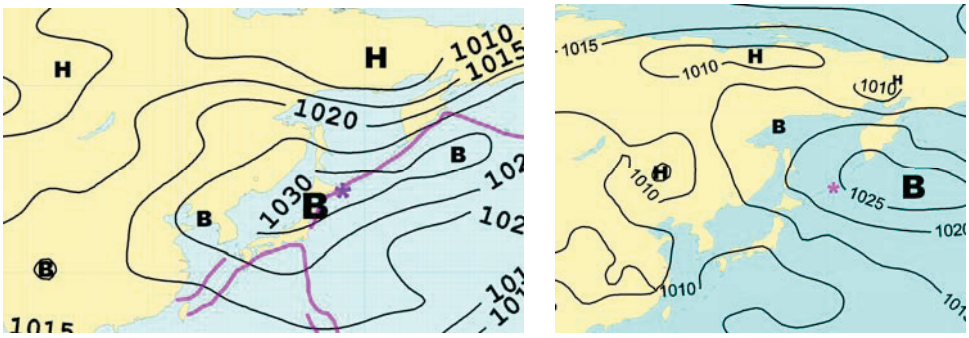


Рис. 3*б*. Землетрясения на Курильских островах в летние месяцы: 24 июня 1973 г. (43.32N, 146.44E) с M = 7,1 (верхний); -07 августа 2004 г. (27.32N, 151.31E) с M = 6,7 (нижний)

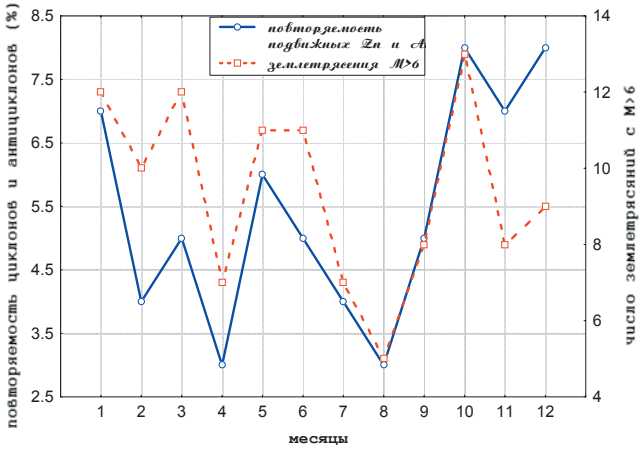


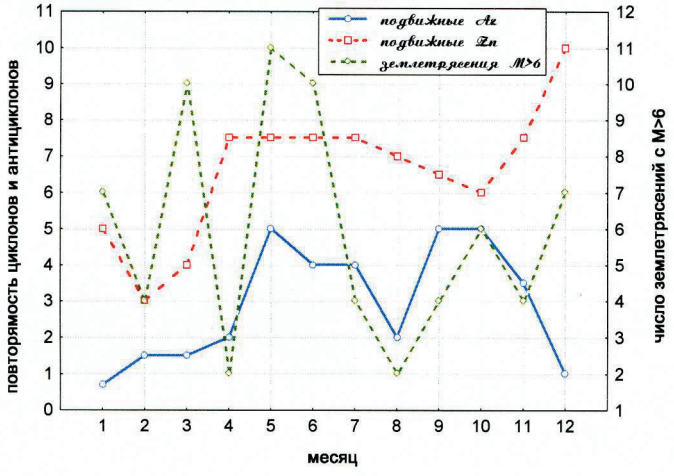
Рис. 4. Внутригодовое комбинированное распределение землетрясений на Курильских островах в сопоставлении с общей повторяемостью подвижных антициклонов и циклонов

Район о. Сахалин

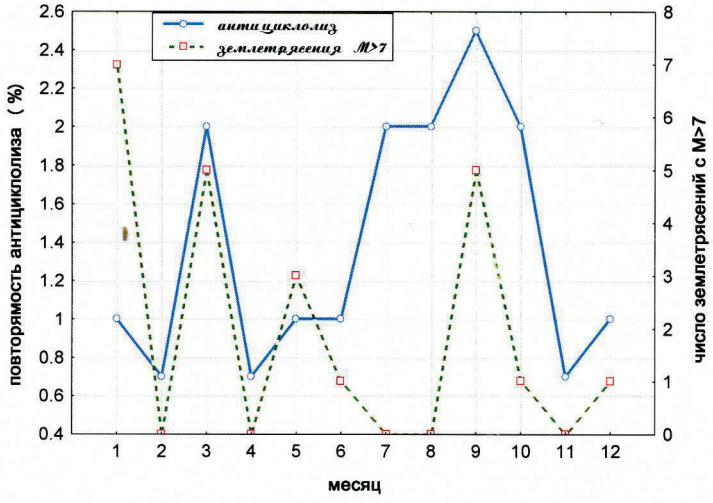
Сахалинско-Японская островная дуга протягивается на 3 тыс. км через острова Сахалин, Хоккайдо, Хонсю, Сикоку и Кюсю [Апродов, 2000]. Остров Кюсю является одновременно и северной частью островной дуги Рюкю. Строение Сахалинско-Японской дуги неоднородно: она состоит из больших и малых литосферных глыб. С восточной стороны Японские острова обрамляют глубоководные желоба. На юге Японии четко выраженные глубоководные желоба отсутствуют. Сахалинская островная глыба имеет сложное строение. Это крупное (длина 948 км) горст-антиклинальное поднятие, расположенное между грабенами-прогибами Татарского пролива на западе и впадиной Дерюгина на востоке. Наиболее важными в сейсмическом отношении являются Восточно-Сахалинский и Западно-Сахалинский краевые глубинные разломы, с которыми связаны 6–7-балльные землетрясения.

На территории о. Сахалин наибольшее количество землетрясений наблюдается в северной, центральной и в южной частях острова. Отдельные землетрясения отмечаются также по всему острову.

Внутригодовое распределение землетрясений с магнитудами M > 6 и M > 7 для территории о. Сахалин имеет более сложных характер, чем для других рассматриваемых регионов и представлено на рис. 5. Внутригодовое распределение землетрясений многомодально, а наибольшее количество сильных землетрясений отмечается в январе, марте, мае-июне, октябре и декабре.



а



б

Рис. 5. Внутригодовое распределение землетрясений с M > 6 на о. Сахалин в сопоставлении с подвижными циклонами и антициклонами (*а*) и процессов антициклолиза для землетрясений с M > 7 (*б*)

Для ряда сейсмоактивных регионов на фоне местного антициклолиза в роли триггера сильных землетрясений выступают атмосферные вихри, центры которых находятся на расстояниях до тысячи километров. Это в полной мере относится к о. Сахалин.

Над территорией о. Сахалин достаточно часто располагаются периферии Сибирского максимума и Алеутской депрессии, а также Гавайского максимума и летней азиатской депрессии [Справочник "Охотское море", 1998]. Это обусловливает влияние на сезонную изменчивость землетрясений не только подвижных циклонов и антициклонов (рис. 5, *а*), но и процессов антициклолиза (рис. 5, *б*). Вклад подвижных циклонов на внутригодовое распределение землетрясений наблюдается только для января и декабря. Подвижные антициклоны влияют на увеличение землетрясений в мае–июне, сентябре и октябре. В январе, марте, мае и сентябре сезонная изменчивость сильных землетрясений с $M \geq 7$ связана с процессами антициклолиза. Это означает, что землетрясения на о. Сахалин часто возникают на периферии атмосферных вихрей центры, которых располагаются в районах Сибирского максимума и Алеутской депрессии, а также Гавайского максимума и летней азиатской депрессией. В зависимости от господствующих в течение месяца указанных атмосферных вихрей суммарный вектор деформационных процессов земной коры, происходящих под воздействием воздушных масс на обширных соседних территориях, приходится на какой-то определенный сейсмоактивный район о. Сахалина. Это наглядно видно из рис. 6, на котором отражены два примера синоптической обстановки в день когда произошли землетрясения на о. Сахалин в различные сезоны года.

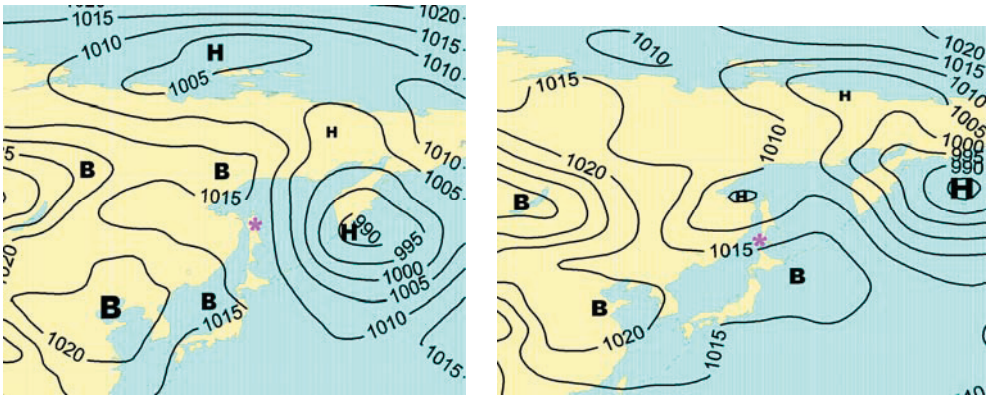


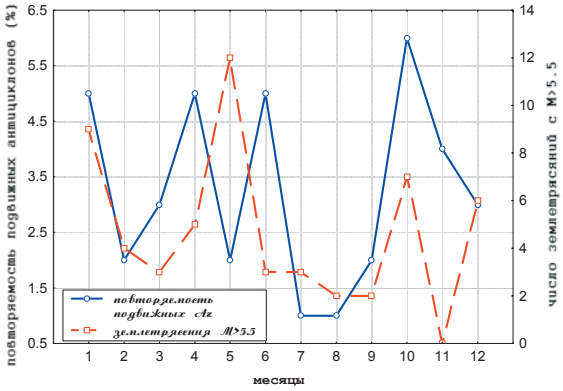
Рис. 6. Землетрясения на о. Сахалин: 28 мая 1995 г. (43.32N, 146.44E) с M = 7,5 (верхний); -11 октября 2007 г (46.95N, 141.82E) с M = 4,7 (нижний)

Район Кавказа

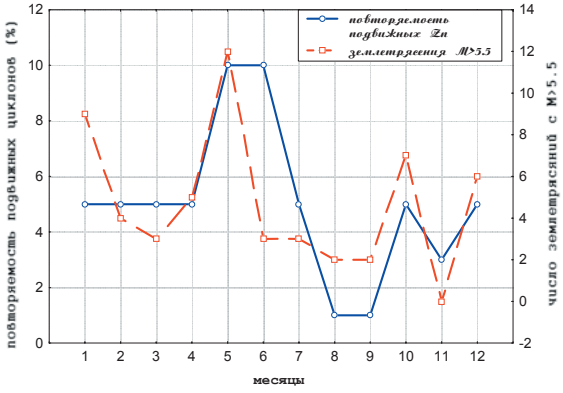
Наибольшее количество землетрясений наблюдаются: в центральной части Большого Кавказа; на западном побережье Каспийского моря; в центральной части Малого Кавказа; в районе Армянского нагорья. Кавказская сейсмическая

структура, являясь частью Копетдагского-Кавказско-Крымской горной системы, представляет собой совокупность складчато-блоковых новейших тектонических структур. По ее разломам происходят интенсивные мелкофокусные землетрясения [Апродов, 2000].

Для района Кавказа, где на фоне повышенного атмосферного давления часто проходят циклонические вихри, и сезонное распределение сильных землетрясений обусловлено, преимущественно, подвижными циклонами. Это хорошо видно на рис. 7, *а*, на котором представлены графики внутригодовой изменчивости подвижных циклонов и землетрясений с магнитудой M ≥ 5,5. Из рисунка видна хорошая когерентность почти во все месяцы года циклонов и землетрясений с коэффициентом корреляции r = 0,57. Подвижные или местные антициклоны оказывают значительное влияние на инициирование землетрясений только в январе и октябре (рис. 7, *б*).



а



б

Рис. 7. Внутригодовое распределение землетрясений на Кавказе
в сопоставлении с подвижными антициклонами (*а*) и подвижными циклонами (*б*)

Результат, представленный на рис. 7, является наглядным примером влияния сезонной изменчивости региональной атмосферной циркуляции на сезонную изменчивость сильных землетрясений.

Район Греции

Район Греции входит в зону землетрясений Восточно-Средиземноморского региона, который характеризуется сложным взаимодействием Африканской, Аравийской и Европейской литосферных плит. В общем виде взаимодействие Африканской, Аравийской и Европейской литосферных плит сводится к движению Африканской и Аравийской плит на север и к сдвигу Малоазиатского литосферного блока на запад, а Адриатического на северо-восток. При этом Малоазиатский блок оказывает сильное воздействие на опущенный Эгейский блок, а также происходит взаимодействие Эгейского блока с Африканской плитой. Это вызывает поддвиг литосферы под Эгейский блок по линии Эллинского глубоководного желоба, протянувшегося от Ионических островов (у западных берегов Греции) до островов Крит и Родос. Эти и ряд других процессов вызывают многочисленные землетрясения на границах взаимодействующих литосферных блоков. Система литосферных блоков

Центральной Греции примыкает к северному флангу Эллинской дуги. В ней выделяются блок полуострова Пелопоннес, блок Пинд, блок островов Эвбея. Они разделены разломами Коринфского залива, проливов Эввоикос, Эврипос. С разломами связаны землетрясения, которые по своей силе превосходят землетрясения Эллинской дуги [Апродов, 2000]. Сложность пространственного распределения литосферных блоков обуславливает и сложность анализа влияния атмосферных процессов на сезонную изменчивость сейсмичности.

Сейчас нам не важна детальная оценка влияния атмосферы на внутригодовую изменчивость сейсмичности по каждому блоку. На данном этапе остановимся на внутригодовой изменчивости землетрясений в целом для всей территории Греции.

Внутригодовое распределение землетрясений с магнитудами более 5 и 6 баллов для территории Греции представлено на рис. 8. Из рисунка следует, что в марте–апреле и августе отмечается наибольшее количество сильных землетрясений. Для других месяцев внутригодовая изменчивость землетрясений с магнитудами более 5 и 6 баллов различна.

Рассмотрим внутригодовую изменчивость землетрясений и оценим их повторяемость на территории Греции для сильных землетрясений с магнитудами более 5 и более 6 баллов. На рис. 8, *а* приведен годовой ход подвижных циклонов, антициклонов и число землетрясений с $M \geq 5$. Из рисунка следует, что для землетрясений с $M \geq 5$ наибольшая повторяемость «обеспечивается» подвижными циклонами в апреле. Второй годовой максимум повторяемости землетрясений – август – обусловлен влиянием подвижных антициклонов. В остальные месяцы года повторяемость землетрясений определяется совместным влиянием подвижных циклонами и антициклонов.

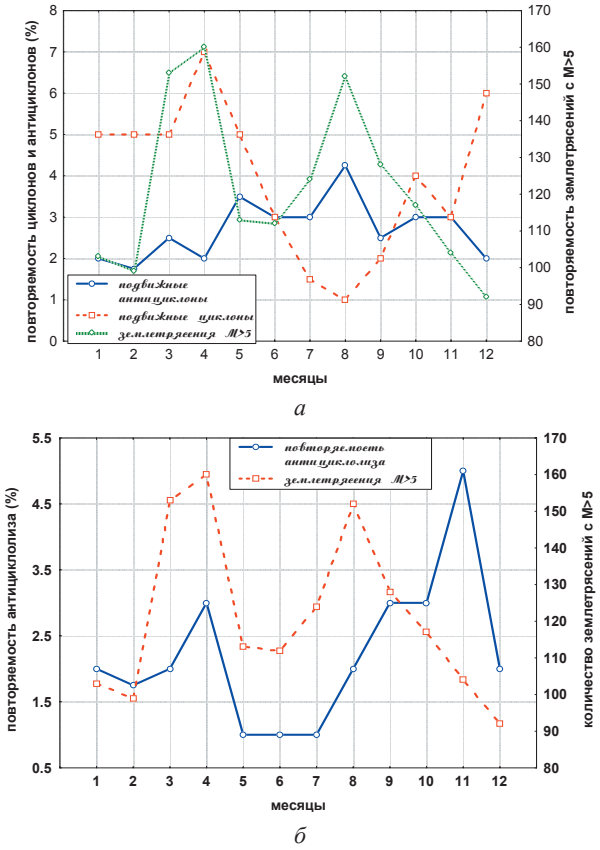


Рис. 8. Внутригодовое распределение землетрясений с M > 5 на территории Греции в сопоставлении с подвижными циклонами и антициклонами (*а*) и процессов антициклолиза (*б*)

Для территории Греции на повторяемость числа землетрясений также влияет и процесс антициклолиза, внутригодовая изменчивость которого представлена на рис. 8, *б*. Анализ графиков числа землетрясений с $M \geq 5$ и повторяемости антициклолиза показывает влияние процессов антициклолиза на сейсмичность Греции. Из рис. 8, *б* видно, что влияние процессов антициклолиза исчезает в осенне-зимний период, и поэтому коэффициент корреляции с землетрясениями не велик и составляет $r = 0{,}21$.

Выводы

Впервые выявлена связь сезонной изменчивости сильных землетрясений в различных сейсмоактивных регионах Земли с региональными атмосферными процессами.

Исследования показали, что внутригодовая изменчивость атмосферных процессов и внутригодовая изменчивость землетрясений в различных регионах

Северного полушария различна. Анализ связи внутригодовой изменчивости атмосферных процессов с внутригодовой изменчивостью сейсмичности достаточно сложен. Однако понимание этой связи определяется в синоптическом диапазоне изменчивости при анализе конкретных случаев сильных землетрясений и преобразований атмосферной циркуляции. Основной причиной внутригодовой изменчивости землетрясений являются сезонные смещения климатических фронтов относительно тектонических разломов от зимы к лету, и наоборот. Воздушные массы создают дополнительные нагрузки на земную кору, усиливая в ней экзогенные процессы и инициируя сейсмические явления.

Литература

1. *Апродов В.А.* Зоны землетрясений. – М.: Мысль, 2000, с. 462.
2. *Барсуков О.М., Шаманин С.В.* Сезонные изменения сейсмичности и скорости вращения Земли // ДАН, РАН, 2001, т. 379, № 1, с. 99-100.
3. *Боков В.Н.* Изменчивость атмосферной циркуляции – инициатор сильных землетрясений // Изв. РГО РАН, 2003, т. 135, вып. 6, с. 54 – 65.
4. *Боков В.Н., Воробьев В.Н.* О связи сильных землетрясений с атмосферной циркуляцией в сезонном и межгодовом диапазонах изменчивости // Сб. трудов конф. «Юбилейные чтения памяти А.Л. Чижевского, посвященные 110-летию ученого» 27–30 ноября 2007. – СПб.: изд. Политех. ун-та, 2007, с. 51-56.
5. *Вершовский М.Г.* Электронный журнал "Исследовано в России", 275, с. 2651-2660, 2006. http://zhurnal.ape.relarn.ru/articles/2006/275.pdf.
6. *Горькавый Н.Н., Левицкий Л.С., Тайдакова Т.А., Трапезников Ю.А., Фридман А.М.* О корреляции графиков угловой скорости вращения Земли и модуля ее временной производной с частотой землетрясений в зависимости от их магнитуды // Физика Земли, 1994, № 10, с. 33-38.
7. *Гохберг М.Б. и др.* О механизме модуляции количества сильных землетрясений и частоты вращения Земли // ДАН, Геофизика, 1995, т. 341. № 3, с. 813-815.
8. *Дещеревская Е.В., Сидорин А.Я.* Ложная годовая периодичность землетрясений, обусловленная сезонными изменениями помех // ДАН, РАН, 2005, т. 400, № 6, с. 798-802.
9. *Дещеревский А.В., Сидорин А.Я.* Двухкомпонентная модель геофизических процессов: сезонные вариации и фликкер-шум // ДАН, РАН, 2001, т. 376, № 1, с. 100-105.
10. *Дещеревская Е.В., Сидорин А.Я.* Внутрисезонные колебания сейсмичности Гармского полигона и их связь с атмосферными процессами // ДАН, РАН, 2005, т. 401,. № 1, с. 80-83.
11. *Дещеревская Е.В., Сидорин А.Я.* Поиск корреляции сейсмичности Гармского полигона с атмосферным давлением и скоростью ветра // Геофизические исследования, 2008, т. 9, № 1, с. 34-39.
12. *Кондратович К.В., Куликова Л.А., Федосеева Н.В.* Изменения атмосферных макропроцессов и температуры водной поверхности Атлантики в XX веке / В сб.: Тимонов В.В. К 100-летию со дня рождения. – СПб.: изд. РГГМУ, 2001, с. 30-37.
13. *Кропоткин П.Н., Люстих А.Е.* Сезонная периодичность землетрясений принцип Ньютона-Маха // ДАН АН СССР, 1974, т. 217, № 5, с. 1061-1064.
14. *Левин Б.В., Сасорова Е.В., Журавлев С.А.* Внутригодовая повторяемость активизации сейсмического процесса для тихоокеанского региона // ДАН АН, 2005, т. 403, № 4, с. 534-540.
15. *Сидоренков Н.С.* Атмосферные процессы и вращение Земли. – СПб: Гидрометиздат, 2002. – 360 с.
16. Справочник "Охотское море". Проект "Моря СССР". Т. IX. Вып. 1. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1998, с. 465.
17. *Сытинский А.Д.* Связь сейсмичности Земли с солнечной активностью и атмосферными процессами. – Л.: Гидрометеоиздат, 1987. – 100 с.
18. *Хайрулин Р.Р.* Атлас синоптических характеристик цикло- и антициклогенеза цикло- и антициклолиза в Северном полушарии. – Обнинск, 1990. – 101 с.

М.А. Моцаков, С.П. Смышляев

МОДЕЛЬ ИЗМЕНЧИВОСТИ ГАЗОВОГО СОСТАВА ПРИЗЕМНОГО СЛОЯ АТМОСФЕРЫ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ПОТОКОВ ХИМИЧЕСКИ АКТИВНЫХ ПРИМЕСЕЙ С ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

M.A. Motsakov, S.P. Smyshlyaev

ATMOSPHERIC BOUNDARY LAYER COMPOSITION MODELING: RESPONSE TO THE CHEMICAL FLUXES FROM SURFACE

Описана разработанная модель химической трансформации в атмосфере продуктов поверхностных выбросов химически активных газов. Модель построена по конечно-разностной схеме и позволяет учесть взаимодействие и обратные связи между химическими процессами в приземном слое атмосферы и приповерхностном слое подстилающей поверхности. Обмен примесями между атмосферой и поверхностью осуществляется по потоковой схеме с учетом разницы концентраций в верхнем слое поверхности и на нижнем уровне приземного слоя. Сравнение результатов модельных расчетов с результатами измерений для озона и других газов показало, что модель правильно воспроизводит основные особенности их распределения в атмосфере и может быть использована для изучения особенностей химического взаимодействия между разными частями геосферы.

Ключевые слова: геосфера, химические процессы, моделирование, обратные связи.

A new model for chemical transformation of trace gases emitted from surface to atmosphere has been developed and described. The model is designed as finite difference numerical one with a possibility to account interaction between chemical processes in the atmospheric boundary layer and upper layer of the surface. Species exchange between surface and atmosphere is considered based on fluxes estimation for the lowermost atmosphere and upper layer of the surface. Model validation with natural observations for ozone and long-lived gases demonstrated that model is capable to catch most of observed features of the studied gases and may be recommended for the future research studies oriented toward investigation of the chemical interaction between surface and atmosphere.

Key words: geo-sphere, chemical processes, modeling, feedbacks.

Введение

В последнее время в мире отмечается тенденция увеличения обмена химически и активными газами между подстилающей поверхностью и атмосферой [1]. В результате поверхностных выбросов значительного количества химически активных газов, с одной стороны, меняется токсикологическая обстановка в приземном слое атмосферы, что является критичным для человека и биосферы [2]. С другой стороны, меняются условия нагрева атмосферы в результате поглощения солнечной радиации химически активными газами и их собственного излучения инфракрасной радиации, что может провести к изменению ус-

ловий погоды и климата [3]. Наконец, изменяются условия химического загрязнения почвы в результате поглощения продуктов химической трансформации газов в атмосфере [4]. При этом важную роль начинают играть обратные связи между химическими процессами в атмосфере и приповерхностном слое подстилающей поверхности.

Обратные связи заключаются в том, что при увеличении количества химически активных составляющих в атмосфере в результате выбросов с подстилающей поверхности меняются условия для прохождения химических реакций в приповерхностном слое суши или океана. В результате этого может или увеличиться поток химически активных газов с поверхности в атмосферу (положительная обратная связь), или уменьшиться поток химически активных газов в атмосферу (отрицательная обратная связь). Конкретные условия для формирования положительной или отрицательной обратных связей зависят от вида подстилающей поверхности, интенсивности выбросов, соотношения между выбросами различных химических составляющих, метеорологических условий на границе раздела и сезона.

Для получения количественных оценок влияния конкретных условий на формирование положительных или отрицательных обратных связей необходимо создавать математические модели химической трансформации исследуемых примесей в приземном слое атмосферы и приповерхностном слое подстилающей поверхности, т.к. только математическая эмуляция происходящих в реальности химических процессов позволяет изучить все многообразие возможных обратных связей [5].

Математические модели химических процессов в окружающей среде требует разработки схем химических реакций, происходящих в приземном слое атмосферы и приповерхностном слое подстилающей поверхности, определения констант этих реакций и зависимости скоростей химических реакций от окружающих условий. В результате создания подобной модели химической трансформации экологически важных примесей в приземном слое атмосферы и приповерхностном слое подстилающей поверхности будет реализована возможность контроля за качеством воздуха и прогноз его изменчивости.

В этой связи основной целью выполнения настоящей работы является создание модели химической трансформации экологически важных примесей в приземном слое атмосферы и приповерхностном слое подстилающей поверхности для анализа их изменчивости с учетом обмена химически активными газами между атмосферой и подстилающей поверхностью.

1. Химический состав приземного слоя атмосферы

Газовый состав приповерхностного воздуха практически полностью определяется потоками химически активных примесей с подстилающей поверхности, т.е. с поверхности суши и океана [1–3]. Более того, химические процессы в стратосфере, т.е. в высотном интервале от 12 до 50 км также, в значительной

степени, зависят от потоков химически активных газов с подстилающей поверхности [2, 6]. Долгоживущие химические газы поверхностного происхождения в результате атмосферной циркуляции перемешиваются по атмосфере и многие из них достигают стратосферы, где определяют баланс азотных, водородных, хлорных и бромных составляющих, влияющих на содержание стратосферного озона [7]. В этой связи процессы, определяющие потоки химически активных газов с земной поверхности в атмосферу, являются критичными, как для приповерхностного слоя воздуха где происходит жизнедеятельность живых существ, так и для свободной тропосферы и стратосферы, химические и физические процессы в которых определяют особенности погоды и климата [1, 3, 5, 8, 9].

Среди газов, оказывающих существенное влияние на химию атмосферы и имеющих поверхностное происхождение, выделяются азотные составляющие, имеющие почвенное происхождение и являющие субъектом антропогенных эмиссий [4, 7, 10], углекислый газ, определяющий формирование парникового эффекта и имеющий как земные, так и океанские источники и стоки [11], метан, определяющий продукцию приземного и тропосферного озона и имеющий только поверхностные источники и не продуцируемый в атмосфере [12], неметановые углеводородные составляющие, играющие сходную с метаном роль в формировании особенностей химии атмосферы и особенно важные для промышленных и населенных районов [13], а также окислы металлов и кремния и фосфаты, влияющие на формирование атмосферного аэрозоля в приповерхностном слое атмосферы и гетерогенные реакции на его поверхности [14].

Один из основных продуктов химической трансформации химически активных газов в атмосфере поверхностного происхождения – озон непрерывно возникает и разрушается в приземном слое атмосферы [15, 16]. Скорость продукции и разрушения озона и, как следствие, его количество в каждый момент времени в фиксированном объеме атмосферы определяет ряд астрономических, метеорологических и химических факторов. Всю совокупность процессов определяющих изменение концентрации озона можно разделить на два класса – динамические и химические. В рамках данной работы рассматриваются последние из них.

2. Методология моделирования изменчивости химического состава приземного слоя воздуха и приповерхностного слоя подстилающей поверхности

Химические процессы в почве, атмосфере и океане можно унифицировано определить как процессы переноса в сплошной среде при наличии химических реакций. Математическая формулировка подобной задачи базируется на системе уравнений неразрывности многокомпонентной среды при наличии локального источника [17]:

$$\frac{\partial X}{\partial t} + V\nabla X = R(X), \qquad (1)$$

где $X = X_1, X_2, ... X_N$ – вектор концентраций рассматриваемых примесей; N – число рассматриваемых примесей, $V \cdot \nabla$ – линейный дифференциальный оператор, описывающий пространственный перенос примеси; R – скорость фотохимического изменения, которая определяется протекающими в сплошной среде процессами фотодиссоциации, бимолекулярными и трехмолекулярными химическими реакциями, мономолекулярным распадом и гетерогенными процессами.

Скорость фотодиссоциации S_i какой-либо компоненты с концентрацией X_i описывается, согласно [4] реакцией первого порядка:

$$S_i = J_i X_i, \tag{2}$$

где J_i – коэффициент фотодиссоциации:

$$J_i = \int_{\Delta\lambda} \sigma_i(\lambda)\upsilon_i(\lambda)F_\lambda d\lambda, \tag{3}$$

где λ – длина волны солнечного излучения, $\Delta\lambda$ – спектральная область фотодиссоциации i-й компоненты, σ_i – сечения поглощения, υ_i – квантовый выход реакции, F_λ – суммарный поток радиации с длиной волны λ в данной точке пространства.

Скорости химических реакций и мономолекулярного распада параметризуются в терминах химической кинетики [18]. При этом скорости бимолекулярных реакций типа

$$X_i + X_j -> X_l + X_m$$

описываются выражением

$$\frac{dX_l}{dt} = \frac{dX_m}{dt} = -\frac{dX_i}{dt} = -\frac{dX_j}{dt} = k_b X_i X_j, \tag{4}$$

где k_b – лабораторная константа данной химической реакции, рассчитываемая по формуле Аррениуса [4]:

$$k_b = A\exp[-E/(RT)], \tag{5}$$

здесь A – лабораторная константа; E – энергия активации данной реакции; R – универсальная газовая постоянная; T – температура.

Более сложным образом описываются скорости протекающих в сплошной среде трехмолекулярных реакций типа

$$X_i + X_j + M -> X_l + M,$$

где M – концентрация всех молекул. Реакции такого типа сильно зависят от давления [5]. При низких давлениях время между столкновениями образующегося на первой стадии реакции возбужденного комплекса с дезактивирующей

молекулой больше или сравнимо со временем жизни возбужденного комплекса и реакция является тримолекулярной. При высоких давлениях время между столкновениями мало по сравнению со временем жизни возбужденного комплекса и он успевает дезактивироваться до распада. Реакция при этом является бимолекулярной. С учетом этого скорость трехмолекулярной реакции описывается по аналогии с бимолекулярными реакциями:

$$\frac{dX_l}{dt} = -\frac{dX_i}{dt} = -\frac{dX_j}{dt} = k_p X_i X_j, \tag{6}$$

где κ_p описывается универсальной формулой Линдемана-Хиншельвуда [4]:

$$k_p = F_p \frac{k_0 M}{1 + k_0 M / k_\infty}, \tag{7}$$

где $F_p = F_0^{[1+(\lg\frac{k_0 M}{k_\infty})^2]^{-1}}$; $k_0 = A_0 (T/300)^{-n}$; $k_\infty = A_\infty (T/300)^{-m}$, а F_0, A_0, A_∞, n, m – лабораторные константы данной химической реакции.

Процессы мономолекулярного распада типа

$$X_i + M -> X_l + X_m + M$$

рассматриваются как реакции второго порядка и их скорости записываются в виде

$$\frac{dX_l}{dt} = \frac{dX_m}{dt} = -\frac{dX_i}{dt} = k_m X_i M, \tag{8}$$

где k определяется по формуле Аррениуса (1.5).

Гетерогенные процессы описываются уравнениями первого порядка [19]:

$$\frac{dX_i}{dt} = -k_a X_i \tag{9}$$

Константы гетерогенных реакций k_a вычисляются в предположении свободномолекулярного режима.

Таким образом, слагаемые в правой части системы (1), выражающие скорости химического изменения рассматриваемых малых газов, можно записать в виде:

$$R_j = \sum_{i,m} k_{im} X_i X_m + \sum_l J_l X_l - (\sum_m k_{jm} X_m + J_j + k_{mj} + k_{aj}) X_j \tag{10}$$

$$j = 1, 2, ..., N,$$

где члены в правой части с положительным знаком описывают химическую продукцию (за счет химических реакций и фотодиссоциационных процессов), а члены с отрицательным знаком – химическое разрушение (за счет химических реакций, фотодиссоциационных процессов, мономолекулярного распада и гетерогенных процессов).

Чтобы полностью сформулировать задачу необходимо еще задать область определения Ω с границей G и задать граничные и начальные условия:

$$lX = g; \tag{11}$$

$$X|_{t=0} = X_0, \tag{12}$$

где l – линейный оператор граничного условия; X_0 – вектор начальных значений концентраций рассматриваемых газов.

В качестве оператора граничного условия для атмосферной химической модели обычно используются потоки химически активных газов с земной или океанской поверхности. При этом эти потоки фиксируются без учета обратного влияния процессов в атмосфере на химические процессы в почве и океане. В настоящем проекте впервые предполагается учитывать обратные связи между химическими процессами в почве, атмосфере и океане. Для этого химические блоки во всех трех сферах будут объединены в интерактивную модель с динамичными граничными условиями.

Сформулированная задача является нелинейной смешанной краевой задачей [20]. Для подобных задач пока не разработаны методы получения аналитических решений и поэтому для их решения используются численные методы [20]. Их применение заключается в замене области непрерывного изменения аргументов областью их дискретного изменения, а также в замене дифференциальных операторов – разностными с дальнейшим решением полученной таким образом алгебраической системы уравнений.

Поставленная задача является смешанной краевой задачей [21]. Для сведения ее к задаче с начальными данными (задаче Коши) необходимо задать шаблон в выбранной пространственной области и аппроксимировать на нем дифференциальные операторы по пространственным переменным их конечно-разностными аналогами. В результате система дифференциальных уравнений (1), (10)–(12) заменяется системой дифференциально-разностных уравнений:

$$\frac{\partial Y}{\partial t} + \Lambda Y = R(Y), \tag{15}$$

где Y – конечно-разностная функция концентраций рассматриваемых газов во всех пространственных узлах, соответствующая непрерывной функции X; Λ – конечно-разностное представление дифференциального оператора ∇.

Рассматриваемая задача Коши обладает рядом специфических особенностей, ограничивающих использование для ее решения многих обычно применяемых численных методов. Так, высокие скорости химических реакций обусловливают сильную связь между уравнениями – ее жесткость [21]. Математически это выражается большим разбросом модуля собственных значений матрицы Якоби [20]:

$$\max[\mathrm{Re}(-\lambda_i)] / \min[\mathrm{Re}(-\lambda_i)] >> 1, \tag{16}$$

где λ_i – собственные числа матрицы Якоби

$$J(t,Y) = \| \partial f / \partial Y \| . \qquad (17)$$

Жесткость задачи приводит к практической непригодности для ее решения явных вычислительных схем, т.к. для устойчивости явной схемы необходимо, чтобы шаг по времени не превышал минимальной временной постоянной системы, отвечающей максимальному собственному значению Якобиана $\tau_{\min} = 1/\max[\mathrm{Re}(-\lambda_i)]$, в то же характерное время задачи определяется максимальной локальной временной постоянной, отвечающей минимальному собственному значению матрицы Якоби. В этой связи, для достижения сходимости решений необходимое количество шагов будет порядка коэффициента жесткости (отношение максимального собственного числа к минимальному), который для атмосферных задач достигает 10^7–10^8 .

В связи с трудностями, возникающими при решении "жестких" задач традиционными методами, разрабатываются специальные методы для подобных систем уравнений [21]. Среди этих методов применительно к фотохимическому моделированию процессов в сплошной среде можно выделить два направления: применение общих методов решения "жестких задач" и разработка специальных методов для фотохимического моделирования.

При применении общих методов для аппроксимации дифференциальных уравнений типа (15) конечно-разностными используются линейные одношаговые или многошаговые А-устойчивые методы, для которых областью абсолютной устойчивости является вся полуплоскость $\mathrm{Re}(\tau\lambda) < 0$. Полученная система алгебраических уравнений решается методом Ньютона-Рафсона [21]:

$$[I - \tau\beta f^{(m)}]J(X_{j+1}^{(m)} - X_j^{(m)}) = -X_{j+1}^{(m)} + \tau\beta f(t+\tau, X_{j+1}^{(m)}) + g, \qquad (18)$$

где I – единичная матрица; τ – шаг по времени; β – неявный коэффициент выбранного А-устойчивого метода; J – якобиан системы; m – номер итерации, g – заданный вектор, объединяющий явные члены уравнения.

Учитывая (2.10), применение метода Ньютона-Рафсона (18) к системе (15) сводится к следующей линеаризации каждого слагаемого суммы (10):

$$k_{il}X_iX_j = k_{il}X_i^jX_l^{j+1} + k_{il}X_i^{j+1}X_l^j - k_{il}X_i^jX_l^j, \qquad (19)$$

где j обозначает номер временного слоя (j – явный, j + 1 – неявный). Для решения получающейся алгебраической системы необходимо на каждом шаге обращать квадратную матрицу размерности (N×K), где N – количество рассматриваемых атмосферных газов, K – число узлов сетки), что оказалось малоэффективным, учитывая уровень доступных ЭВМ.

3. Валидация модели по результатам измерений

Для валидации модели обмена химическими примесями между подстилающей поверхностью и атмосферой было произведено сравнение результатов

модельных расчетов с результатами измерений. Сравнение результатов моделирования с измерениями проводилось для сезонно-широтной изменчивости анализируемых газов для территории Российской Федерации. Это связано с отсутствием глобального охвата данными измерений по всей территории РФ, а осреднение по долготе позволяет проводить сравнение и по ограниченному количеству данных измерений.

Одним из универсальных критериев качества модели является ее способность воспроизводить распределения озона, сезонно-широтная изменчивость которого определяется взаимодействием химии и динамики атмосферы [22, 23]. При этом основные, наиболее характерные черты изменчивости содержания озона в приземном слое атмосферы в наибольшей степени контролируются изменчивостью потоков химически активных веществ с подстилающей поверхности. Таким образом, способность модели воспроизводить сезонно-широтную изменчивость содержания озона в приземном слое атмосферы, главным образом характеризует достоверность модельного описания обмена химически активными газами между приповерхностным слоем подстилающей поверхности и приземным слоем атмосферы.

На рис. 3.1 представлено высотно-широтное распределение отношения смеси озона для средних месяцев четырех сезонов, осредненное по результатам измерений в приземном слое атмосферы для территории Российской Федерации [24, 25]. Можно отметить следующие характерные черты в распределении озона:

а) максимум отношения смеси в южных широтах, в течение всего года;

б) сдвиг максимума концентрации в сторону летнего полушария в сезоны солнцестояния (январь и июль);

в) наклон изолиний концентраций из зимнего полушария в летнее полушарие, в верхней части приземного слоя атмосферы;

г) повышенные максимальные значения концентрации озона, превышающие 10 ppm весной и осенью;

д) сгущение линий постоянной концентрации озона в нижней части южных широт.

На рис. 3.2 представлены рассчитанные с помощью модели приземного слоя атмосферы и приповерхностного слоя подстилающей поверхности отношения смеси озона для тех же месяцев и также осредненные для 1986–1996 гг. Модельный комплекс качественно хорошо воспроизводит все отмеченные выше высотно-широтные особенности концентрации озона. Среди количественных отличий можно отметить некоторую недооценку концентрации озона в верхней части приземного слоя.

Кроме валидации по озону в настоящей работе проводилось также сравнение результатов расчетов и измерений для долгоживущих газов приземного слоя атмосферы. Долгоживущими являются газы, имеющие время жизни относительно разрушения фотохимическими процессами намного превосходящее характерное время переноса воздушных масс атмосферными процессами. Срав-

нение модельных распределений долгоживущих газов с результатами измерений характеризует правильность соотношения между моделированием химии и циркуляции атмосферы.

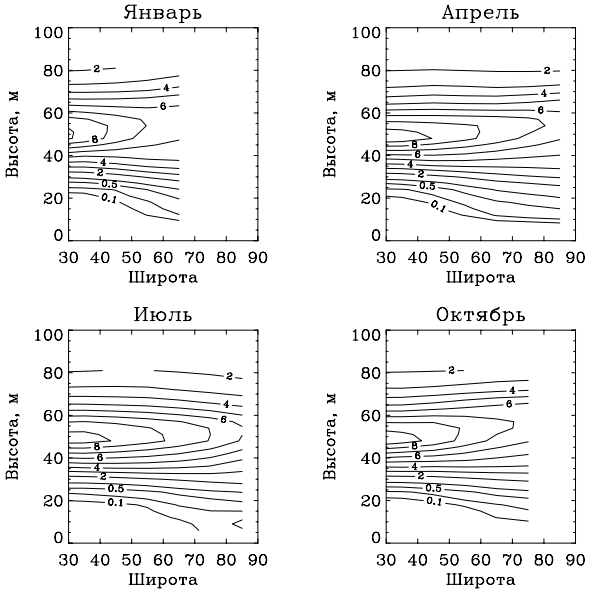


Рис. 3.1. Отношение смеси озона в приземном слое атмосферы по результатам наблюдений

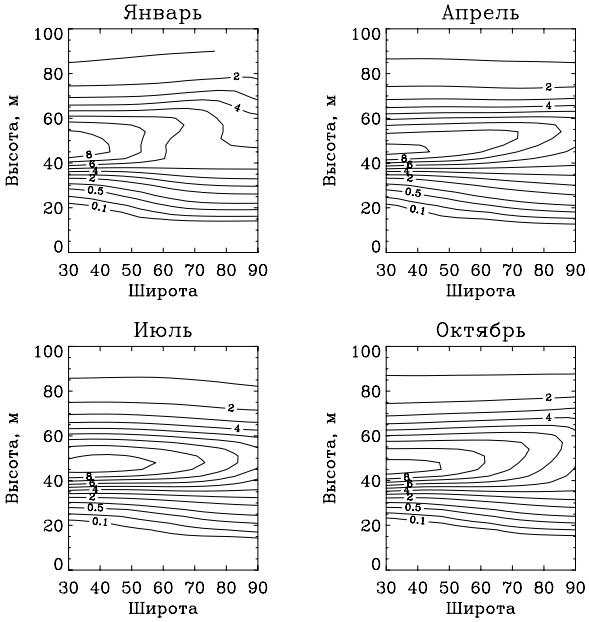


Рис. 3.2. Отношение смеси озона в приземном слое атмосферы по результатам модельных расчетов

Среди долгоживущих газов, играющих важную роль для распределения озона, выделяют метан (CH_4) и закись азота (N_2O). Метан является источником водорода и способствует образованию озона в нижней атмосфере, а закись азота является основным источником азотосодержащих радикалов, являющихся основными разрушителями озона в средней стратосфере. Эти газы измерялись различными приборами со спутника UARS, что позволило составить композиционные базы данных об особенностях высотно-широтного распределения метана и закиси азота в стратосфере [47].

На рис. 3.3 приведены отношения смеси метана, полученные в результате зонального осреднения результатов измерений прибором HALOE со спутника UARS. Результаты приведены для средних месяцев четырех сезонов, осредненные за период измерений. Метан является газом, попадающим в атмосферу в результате эмиссий с земной поверхности, и не имеет химической продукции в атмосфере. Его разрушение в атмосфере происходит в результате химического взаимодействия с OH и, в меньшей степени, в результате фотодиссоциации и взаимодействия с атомарным кислородом.

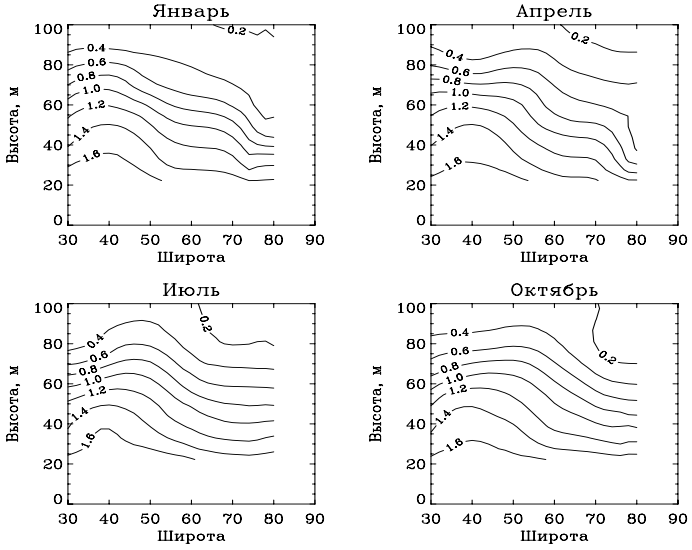


Рис. 3.3. Отношение смеси метана по результатам измерений прибором HALOE спутника UARS

Особенности попадания метана в атмосферу и его разрушения там приводят к монотонному убыванию концентрации с высотой. При этом в тропосфере отношение смеси метана практически однородно, как по высоте, так и по широте. В стратосфере характерными особенностями распределения метана являются: повышенные концентрации в тропической зоне, характеризующие сильный подъем вертикальными потоками в течение всего года; широтное выравнивание в средних и высоких широтах, особенно заметное в зимнем полушарии, характеризующее активность планетарных волн; сдвиг тропического максимума в Юж-

ное полушарие в верхней стратосфере и более равномерное широтное распределение отношения смеси в верхней стратосфере для равноденствия (апрель и октябрь).

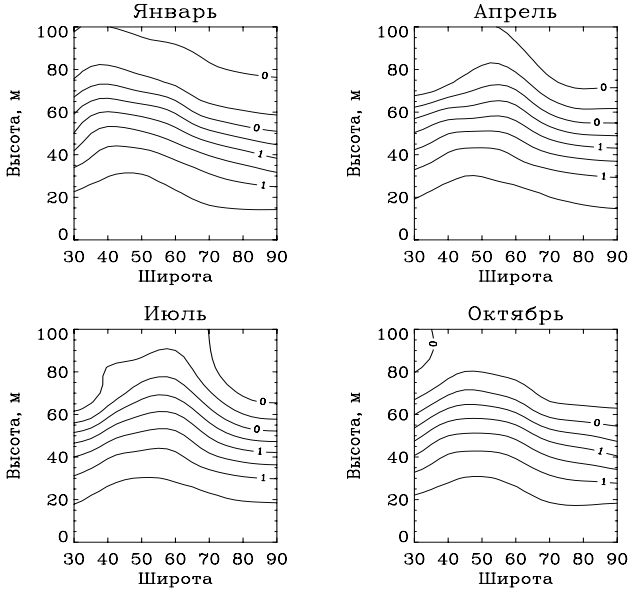


Рис. 3.4. Отношение смеси метана по результатам модельных расчетов

На рис. 3.4 приведено отношения смеси метана, рассчитанное на модели приземного слоя атмосферы и приповерхностного слоя подстилающей поверхности. Модель качественно хорошо воспроизводит наблюдаемые особенности распределения метана. В количественном отношении можно отметить, что в верхней части приземного слоя атмосферы модель занижает концентрации метана, со сдвигом на 1-2 шага модельной сетки.

На рис. 3.5 приведено высотно-широтное распределение закиси азота по результатам измерений прибором CLAES на спутнике UARS. Закись азота, также как и метан, имеет поверхностные источники, что приводит к монотонному убыванию ее концентрации с высотой. Атмосферная химия закиси азота отличается от химии метана тем, что, во-первых, для N_2O существует небольшой атмосферный источник в результате химического взаимодействия окислов азота, а, во-вторых, основное разрушение закиси азота происходит в результате взаимодействия с возбужденным атомарным кислородом, а не с водородными радикалами.

Концентрация атомарного кислорода, в отличие от гидроксила, сильно увеличивается с высотой, при незначительных количествах у земной поверхности. В результате, в тропосфере закись азота практически не разрушается и вся попадает в стратосферу, где в результате химических реакций с возбужденным атомарным кислородом продуцирует окислы азота, которые в каталитических реакциях разрушают стратосферный озон. Тем не менее, химическое разруше-

ние закиси азота в стратосфере не приводит к его значительному разрушению и химическое время жизни N_2O составляет 100–120 лет, что приводит к динамическому контролю его пространственно-временного распределения.

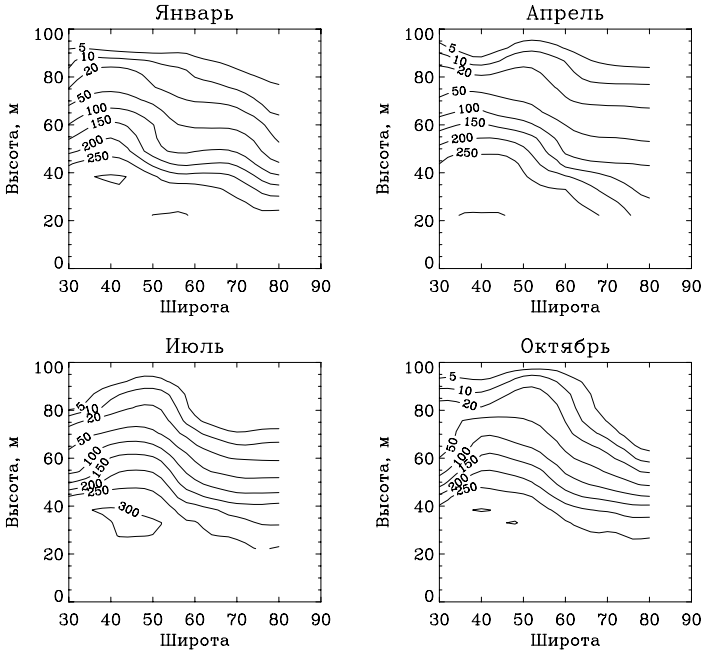


Рис. 3.5. Отношение смеси метана по результатам измерений

Все те же характерные черты в распределении отношения смеси, которые отмечались в высотно-широтных профилях метана, и которые объясняются особенностями циркуляционных процессов в приземном слое атмосферы, можно наблюдать и у закиси азота. В частности, отмечается и повышенное значение концентраций в южной части, сдвиг максимумов отношений смеси в летнее полушарие, выравнивание концентраций в полярных и умеренных широтах в зонах разрушения планетарных волн и более однородное широтное распределение закиси азота в верхней части приземного слоя в апреле и сентябре по сравнению с январем и июлем.

Химическое время жизни закиси азота в приземном слое атмосферы в три раза больше времени жизни метана, поэтому она в большей степени контролируется динамическими процессами и в меньшей – химией. Из-за этого в моделируемом распределении N_2O более заметны различия в той части, которая контролируется атмосферной циркуляцией.

По результатам моделирования распределения долгоживущих газов метана и закиси азота в приземном слое атмосферы и сравнения полученных высотно-широтных профилей с измерениями со спутника UARS, можно заключить, что использование данных о потоках химически активных примесей с подстилаю-

щей поверхности в атмосферу позволило хорошо качественно и, в значительной степени, количественно воспроизвести наблюдаемые особенности распределения CH_4 и N_2O.

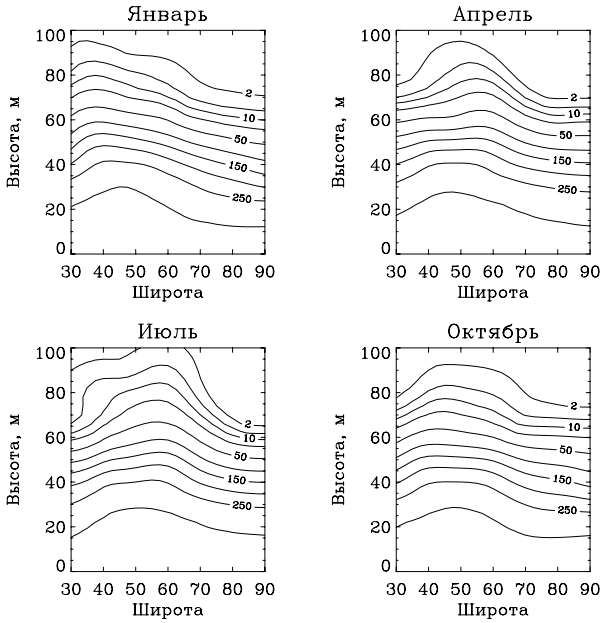


Рис. 3.6. Отношение смеси закиси азота по результатам моделирования

Сравнение результатов модельных расчетов с результатами измерений для озона и других газов показало, что модель правильно воспроизводит основные особенности их распределения в атмосфере и может быть использована для изучения особенностей химического взаимодействия между разными частями геосферы.

Заключение

Описана разработанная модель химической трансформации в атмосфере продуктов поверхностных выбросов химически активных газов. Модель построена по конечно-разностной схеме и позволяет учесть взаимодействие и обратные связи между химическими процессами в приземном слое атмосферы и приповерхностном слое подстилающей поверхности. Обмен примесями между атмосферой и поверхностью осуществляется по потоковой схеме с учетом разницы между концентрациями в верхнем слое подстилающей поверхности и на нижнем уровне приземного слоя атмосферы.

Сравнение результатов модельных расчетов с результатами измерений для озона и других газов показало, что модель правильно воспроизводит основные особенности их распределения в атмосфере и может быть использована для изучения особенностей химического взаимодействия между разными частями геосферы.

Литература

1. *Андруз Дж., Бримблекумб П., Джикелз Т., Лисе П.* Введение в химию окружающей среды / Пер с англ. – М.: Мир, 1999.
2. *Vallero D.* Fundamental of Air Pollution / D. Vallero // Academic Press. 2007, p. 77-80.
3. *Jacob D.J.* Introduction to Atmospheric Chemistry // Princeton Univ. Press. 1999, p.23-24.
4. *Seinfeld J.H.*, *Pandis S.N.* Atmospheric Chemistry and Physics // Wiley Interscience. 1998, p. 22-26.
5. *Stockwell W. R.* A new mechanism for regional atmospheric chemistry modeling / W. R. Stockwell, F. Kirchner, M. Kuhn // J. Geophys. Res., 102, 25,847-825,879. 1997, p. 20-21.
6. *Фелленберг Г.* Загрязнение природной среды. Введение в экологическую химию / Пер. с нем. – М.: Мир, 1997.
7. *МакИвен М., Филлипс Л.* Химия атмосферы. – М., 1978.
8. *Baklanov A., Korsholm U., Mahura A., Petersen C., Gross A.* Enviro-HIRLAM: on-line coupled modelling of urban meteorology and air pollution. *Advances in Science and Researc*h, 2, 41-46, 2008a.
9. *Grell G.A., Knoche R., Peckham S.E., McKeen S.* Online versus offline air quality modeling on cloud-resolving scales. *Geoph. Res. Let.*, 31, L16117, doi:10.1029/2004GL020175, 2004.
10. *McElroy M.B., Wang Y.X.* (2005), Human and animal wastes: Implications for atmospheric N_2O and NO_x, *Global Biogeochem. Cycles*, 19, GB2008, doi:10.1029/2004GB002429.
11. *Cao M., Prince S.D., Shugart H.H.* (2002), Increasing terrestrial carbon uptake from the 1980s to the 1990s with changes in climate and atmospheric CO_2, *Global Biogeochem. Cycles*, 16(4), 1069, doi:10.1029/2001GB001553.
12. Greenhouse Gas Emissions and Climate Change // State of the Environment Report, 2008.
13. *Grannas A.M., Shepson P.B., Filley T.R.* (2004), Photochemistry and nature of organic matter in Arctic and Antarctic snow, *Global Biogeochem. Cycles*, 18, GB1006, doi:10.1029/2003GB002133.
14. *Уорк К., Уорнер С.* Загрязнение воздуха. Источники и контроль / Пер. с англ. – М., 1980.
15. *Еланский Н.Ф.* Российские исследования атмосферного озона в 1999–2002 гг. // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. 2004, т. 40, № 4, с. 587-596.
16. Еланский Н.Ф. Мониторинг атмосферы: вклад России // Наука в России. 2004. № 6, с. 20–26.
17. *Смышляев С.П., Галин В.Я., Володин Е.М.* Модельное исследование межгодовой изменчивости содержания атмосферного озона в средних широтах // Известия РАН. Физика атмосферы и океана, 2004, т. 40, № 2, с. 211-222.
18. *Эммануэль А.Б., Кнорре Р.Б.* Основы химической кинетики. Наука. 1968. – 413 с.
19. *Перов С.П., Хргиан А.Х.* Современные проблемы атмосферного озона. – Л.: Гидрометеоиздат, 1980. – 288 с.
20. *Самарский А.А.* Введение в теорию разностных схем. – М.: Наука, 1971.
21. Современные численные методы решения обыкновенных дифференциальных уравнений. – М.: Мир, 1979. – 312 с.
22. *Borghans J.A.M.* Extending the quasi-steady state approximation by changing variables / J.A.M. Borghans, R.J. de Boer, L.A. Segel // Bull. Math. Biol. 1996. № 58, p. 43-63.
23. Kaminski T., Knorr W., Rayner P.J., Heimann M. (2002) Assimilating atmospheric data into a terrestrial biosphere model: A case study of the seasonal cycle, *Global Biogeochem. Cycles*, 16(4), 1066, doi:10.1029/2001GB001463.
24. *Еланский Н., Вайсфлог Л., Путц Э.* Природные пестициды // Наука в России. 2006. № 1, с. 19–22.
25. *Меньшиков В.В., Швыряев А.А.* Опасные химические объекты и техногенный риск: Уч. пос. – М.: Химия, фак-т Моск. ун-та, 2003.

Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках мероприятия 1.3.2 Федеральной целевой программы «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 гг. (государственный контракт № П1693 от 21 сентября 2009 г.) по направлению «Геохимия».

Аль-Бухайри Осама Ахмед, Н.П. Смирнов

МНОГОЛЕТНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ВЫПАДЕНИЯ ОСАДКОВ В РЕСПУБЛИКЕ ЙЕМЕН ЗА ПОСЛЕДНИЕ 50 ЛЕТ

Al-Buhairi Osama Ahmed, N.P. Smirnov

LONG-TERM CHANGES IN PRECIPITATION AT REPUBLIC YEMEN OVER THE LAST 50 YEARS

Исследование закономерности изменения выпадения количества осадков на Аравийском полуострова в районе республики Йемен за последние 50 лет. Анализируются тренды в изменениях осадков. Выполнен анализ связи изменения выпадения осадков с динамикой индекса Северо-Атлантического колебания, характеризующего изменения интенсивности циркуляции атмосферы в Атлантическом регионе северного полушария. Рассмотрено также влияние Индоокеанского антициклона на изменения осадков в прибрежном районе на юге Аравийского полуострова.

Ключевые слова: многолетние колебания осадков, циркуляция атмосферы, Северо-Атлантическое колебание, Индоокеанский антициклон.

The changes in precipitation patterns on Arabian Peninsula (Republic Yemen) for the past 50 years were investigated. Trends in precipitation were analyzed. The analysis of the correlation of changes in the precipitation and index of North Atlantic Oscillation dynamics, which characterizes the change in the intensity of atmospheric circulation in the Atlantic region of Northern hemisphere, was done. We also consider the influence of Indian Ocean anticyclone on changes in precipitation in the coastal area in the south of the Arabian Peninsula.

Key words: Long-term fluctuations of precipitation, atmosphere circulation, North-Atlantic Oscillation, Indian Ocean anticyclone.

Республика Йемен расположена на Юго-западе Аравийского полуострова (рис. 1).

Для Аравийского полуострова в целом типичны пустынные ландшафты с осадками менее 100 мм [5]. В пустынях центральной части полуострова дождей иногда не бывает практически весь год и если они и выпадают, то, как правило, в виде ливней. На большой части Йемена количество осадков также мало и не превышает 100 мм в год, как и в других частях полуострова [3]. Только на крайнем западе республики количество осадков несколько увеличивается и на побережье западнее хребта Худжа (ст.Тайз) могут превышать 500 мм за год. Однако на южном побережье Йемена, в районе Баб-эль-Мандебского пролива средняя многолетняя величина осадков за год составляет всего 30 мм. Далее к востоку она несколько увеличивается и в Салала (Оман, у западной границы с Йемен) составляет 76 мм за год.

В центральной части Аравийского полуострова, как уже указывалось, величины осадков менее 100 мм, и в пунктах, взятых нами для сравнения, составляют: Медина – 54 мм за год и в Дахране, расположенном на низменном востоке на берегу Персидского залива – 74 мм за год.

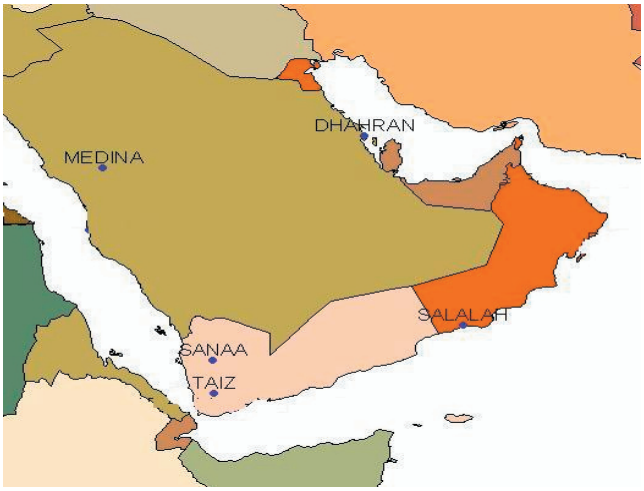


Рис. 1. Карта-схема Аравийского полуострова с указанием расположения станций наблюдения за осадками, которые использовались в данной работе

Поэтому для всего Аравийского полуострова, в том числе для республики Йемен проблема водных ресурсов одна из важнейших как в обеспечении жизни людей, так и экономики страны. Следует иметь в виду ещё значительные колебания выпадения осадков как от года к году, так и в течение года. Даже в Таизе, наиболее обеспеченному месту осадками в Йемен, количество осадков в наиболее "дождливый" летний сезон может колебаться от 24 до 142 мм в среднем за месяц. Ещё большие различия наблюдаются в другие сезоны года, и особенно в засушливых районах.

Больше всего осадков на территории Йемена выпадает весной и летом (рис. 2).

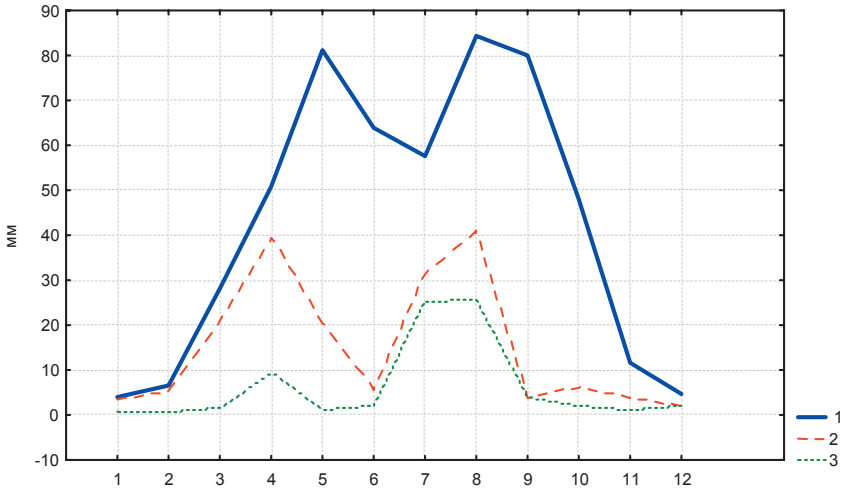


Рис. 2. Сезонный ход количества осадков за месяц на станциях Таиз (1), Сана (2) и Салала (3)

В основном это апрель–май и июль, август. Минимум выпадения осадков: декабрь, январь, февраль. Снижение осадков, особенно в засушливой части страны наблюдается в мае–июне, когда осадки практически не выпадают.

Следует отметить, что в центральной части Аравийского полуострова максимальные осадки выпадают весной на западе (Медина) и зимой на востоке (Дахран).

Такой характер распределения осадков на Аравийском полуострове связан с особенностью циркуляции атмосферы в этой области земли. Над красным морем и западным побережьем Аравийского полуострова вдоль горного хребта до 19 ° с.ш. преобладают северо-западные ветра [6]. С октября по декабрь они слабые (2,4–4,4 м/с). В этот период южнее 19° с.ш. наблюдаются юго-восточные ветра с Аравийского континента. К летнему периоду северо-западные ветра усиливаются и полностью преобладают вплоть до океана, всё более отклоняясь к востоку по мере приближения к океану. Эти ветра и приносят влагу на западное побережье Йемена.

Что касается восточной части Аравийского полуострова, то в летний период на юге начинает сказываться влияния индоокеанского максимума давления с переносом влаги с Индийского океана. В зимний же период ветра в основном с востока, с Персидского залива и северной части Аравийского моря.

В Центральной и Северной частях Аравийского полуострова в основном господствуют слабые западные ветра в зимний период, которые усиливаются к весне и меняют направление на северо-западное, особенно, в восточной части полуострова. По-видимому, именно с ними и связано поступление влаги в северную половину Аравийского полуострова.

Что касается тропических циклонов, то они не оказывают заметного влияния на Аравийский полуостров и в основном под их воздействием находится полуостров Индостан (рис. 3 [2]).

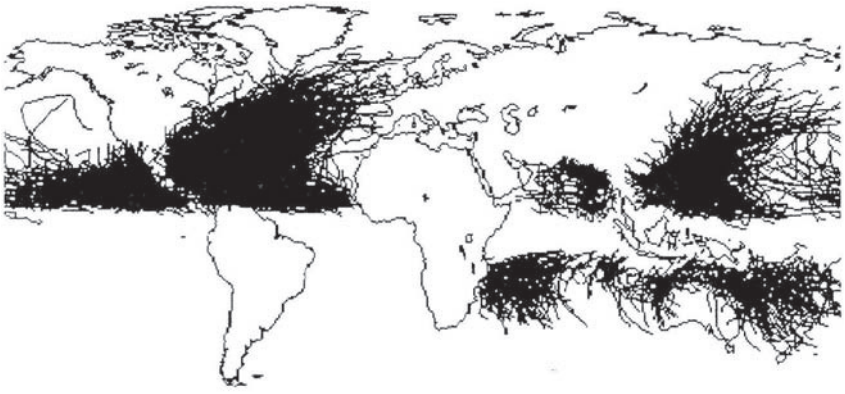


Рис. 3. Треки тропических циклонов по данным базы www.csc.noaa.gov/hurrican_tracks (по [2]).

На рис. 4 и 5 представлены значения осадков за год по пяти рассматриваемым станциям и значения их трендов.

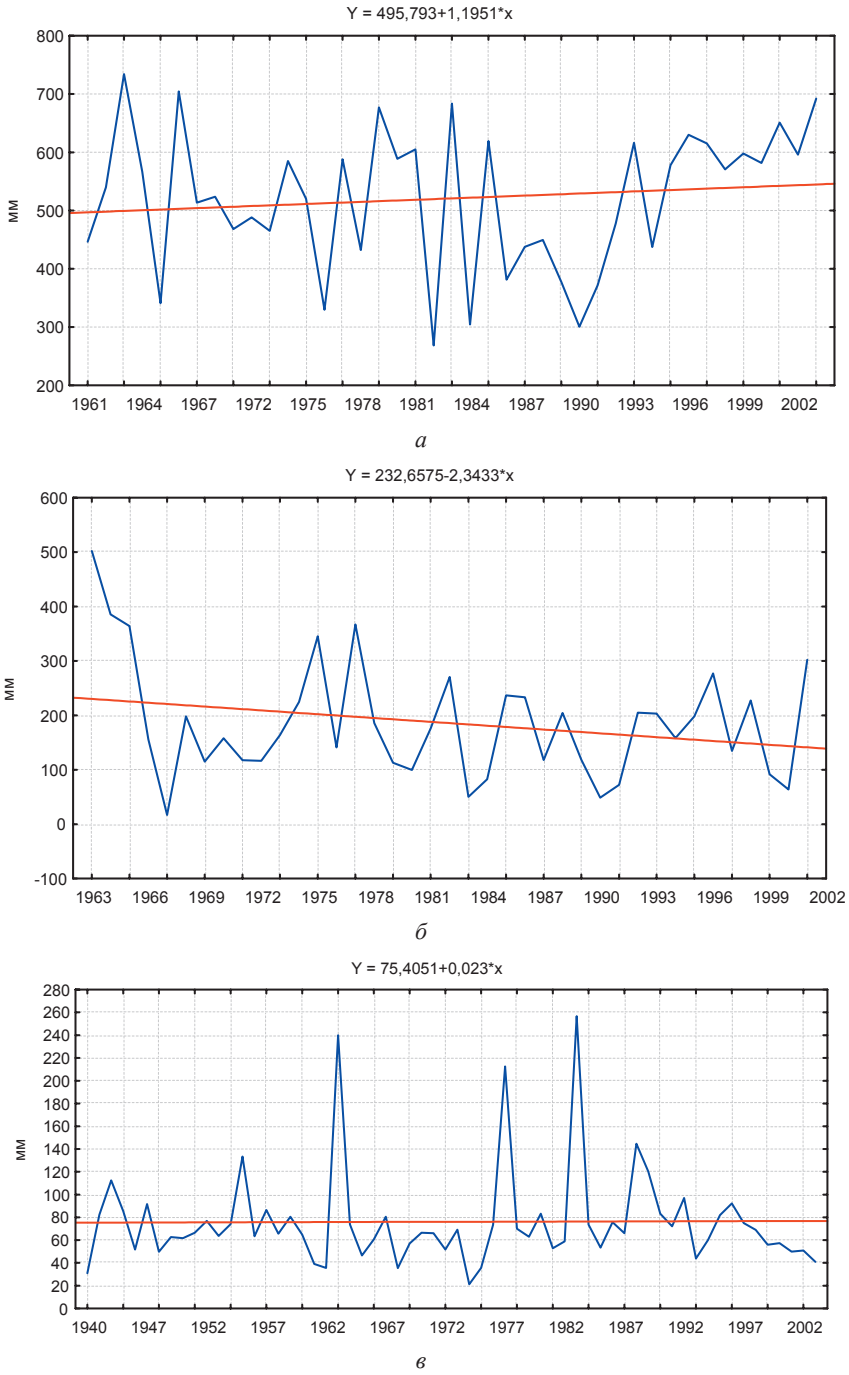


Рис. 4. Значения осадков за год на станциях Таиз (*а*), Сана (*б*) и Салала (*в*) и их тренды

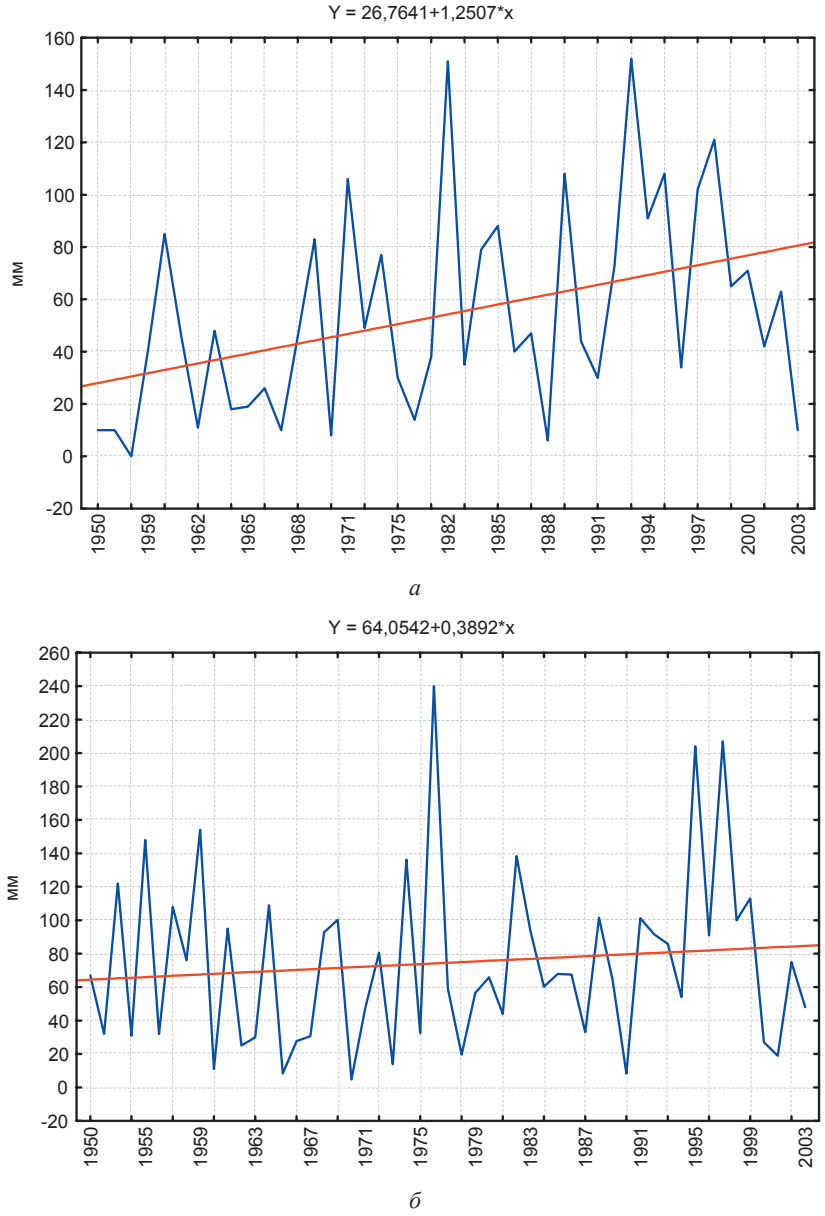


Рис. 5. Значения осадков за год на станциях Медина (*а*), Дахран (*б*) и их тренды

Из рисунков видно, что колебания осадков год от года очень велики и это относится не только к засушливым областям Аравийского полуострова, но и станциям, расположенным на юго-западе. В табл. 1 приведены статистические данные по станциям за период наблюдений.

Таблица 1

Статистические данные колебания осадков за год на станциях Аравийского полуострова

№ п/п	Название станции	Число лет	Среднее значение, мм	Максимальное значение, мм	Минимальное значение, мм	Стандартное отклонение (σ), мм
1	Таиз	41	520	734	268	121,6
2	Сана	39	186	502	17	105,6
3	Салала	62	76	256	21	43,1
4	Медина	43	54	152	0	39,5
5	Дахран	53	75	240	5	52,5

Как видно из табл. 1, амплитуды колебаний величины выпадающих осадков за год в засушливых областях Аравийского полуострова и Йемена, в частности, достигает трёх среднегодовых значений и только на юго-западном побережье близко к среднему значению.

На рис. 4 и 5 приведены, как уже указывалось, и линейные тренды рассматриваемых рядов. В табл. 2 приведены величины трендов для каждой станции, а также средние значения рядов и среднеквадратические отклонения.

Таблица 2

Средние значения, стандартные отклонения и линейные тренды годовых значений осадков за последние 40 лет на станциях Аравийского полуострова

№ п/п	Название станции	Число лет	Среднее значение, мм	Стандартное отклонение (σ), мм	Тренд за 40 лет
1	Таиз	41	520	121,6	+47,8
2	Сана	39	186	105,6	-93,7
3	Салала	62	76	43,1	+0,9
4	Медина	43	54	39,5	+50,0
5	Дахран	53	75	52,5	+15,6

Достаточно очевидно, из табл. 2 следует, что за последние 40 лет мы не наблюдали ни однозначного повышения осадков, ни понижения их на территории Аравийского полуострова. На трёх станциях из пяти тренд не значимый (Таиз, Салала и Дахран). На станции Сана наблюдался значимый отрицательный тренд, а на станции Медина – значимый положительный тренд. Наличие таких трендов не совсем понятно. Можно предположить, что положительный тренд на ст. Медина связан с активным освоением этого региона нефтедобывающими предприятиями, увеличением запылённости и, как следствие, увеличением количества ядер конденсации в переносимой северо-западными и северными ветрами влаге.

Что касается ст. Сана, которая расположена в горах, на их восточном склоне, то ослабления переносов влаги северо-западными ветрами и смещения основных перенос к северу, сказалось на выпадении осадков в районе этой значительно сильнее, чем расположенной на побережье к западу от хребта ст. Таиз.

Разобраться в причинах многолетней изменчивости изменения климата на Аравийском полуострове, расположенном близ границы двух океанов Атлантического и Индийского, а следовательно, и выпадающих на его территории осадков, достаточно трудно. Однако попытку оценить влияние некоторых факторов,

формулирующих колебания климата на всей территории Европы, большей территории Азии и части территории Африки, сделать можно. Таким фактором является Северо-атлантическое колебание (North Atlantic Oscillation – NAO). Индекс этого колебания, определяемый как разность давления за три зимних месяца между станциями, близко расположенными к центрам Азорского антициклона и Исландского минимума давления, описывает климатические изменения на большей территории северного полушария. В районе [4] получен обобщённый индекс NAO, который учитывает не только интенсивность указанных центров действия атмосферы, но в определённой степени и их положение. Этим индексом мы и воспользовались для рассмотрения того, насколько влияет динамика циркуляции атмосферы в Атлантическом регионе северного полушария на выпадение осадков в Йемене и других станциях Аравийского полуострова.

На рис. 6 приведено сопоставление пятилетних скользящих средних значений индекса NAO с величинами осадков за летний период наиболее дождливых на двух станциях на юго-востоке Йемена.

Как следует из рисунка, при увеличении индекса NAO количество осадков на юго-востоке Йемена уменьшается ($r = –0,50$). Это связано с тем, что при увеличении индекса пути Атлантических циклонов смещаются к северу и количество осадков выпадающих в более южных районах уменьшается [1]. Вышеуказанный факт был установлен на циклонах чисто Атлантического происхождения. Однако полученные нами результаты (рис. 7) свидетельствуют, что эта закономерность свойственна и средиземноморским циклонам.

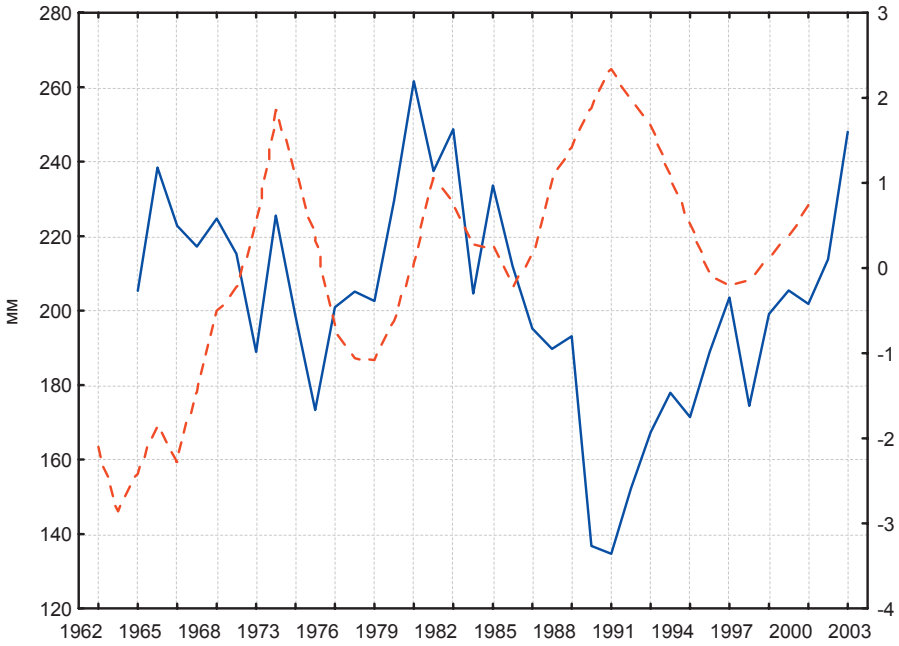
На рис. 7 мы видим, что количество осадков на станциях, расположенных севернее Саны и Таиза имеют противоположный характер связи с индексом NAO. На станциях Медина и Дахран количество осадков увеличивается с увеличением индекса NAO ($r = 0,77$). Таким образом, мы получили результат, соответствующий осадкам над территорией Европы. Это ещё раз указывает на большую универсальность индекса Северо-Атлантического колебания для исследования многолетних изменений климата.

Однако выпадение осадков на станции Салала не показало значимой связи (отрицательный) соответствовал южным станциям.

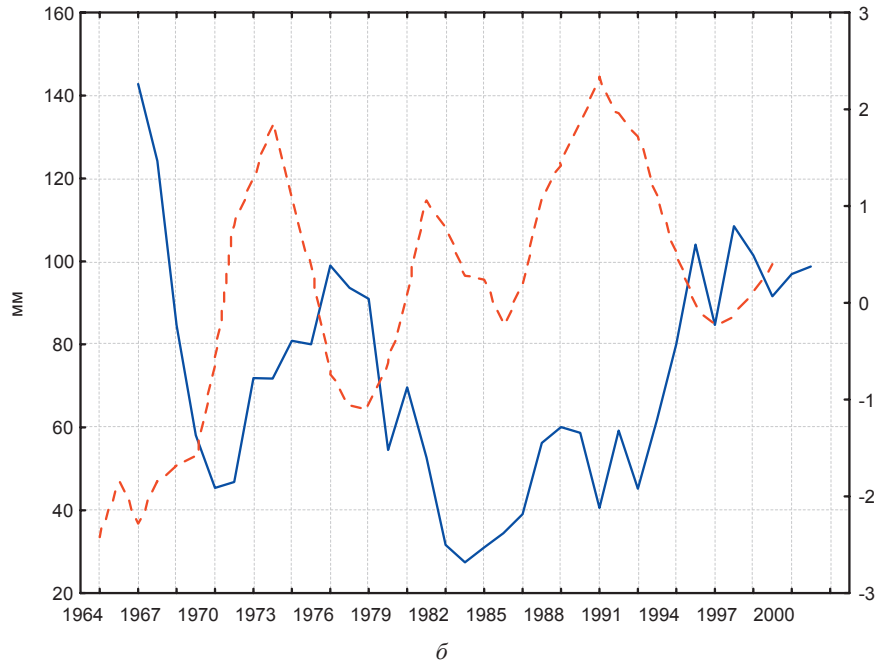
Поэтому мы сделали предположения, что на величину осадков на этой станции может влиять Индоокеанский антициклон [4]. При его смещении на юго-запад происходит и некоторое смещение летнего юго-западного муссона к северо-западу, и в этом случае в летний период происходит увеличение осадков на южном побережье Аравийского полуострова. Рис. 8 подтверждает это предположение соответственно с широтой и долготой).

В заключение можно сделать следующие выводы:

– многолетняя изменчивость выпадения осадков на Аравийском полуострове в целом, и даже на территории Йемена носит достаточно сложный характер и зависит в силу положения полуострова и особенностей рельефа от ряда факторов;

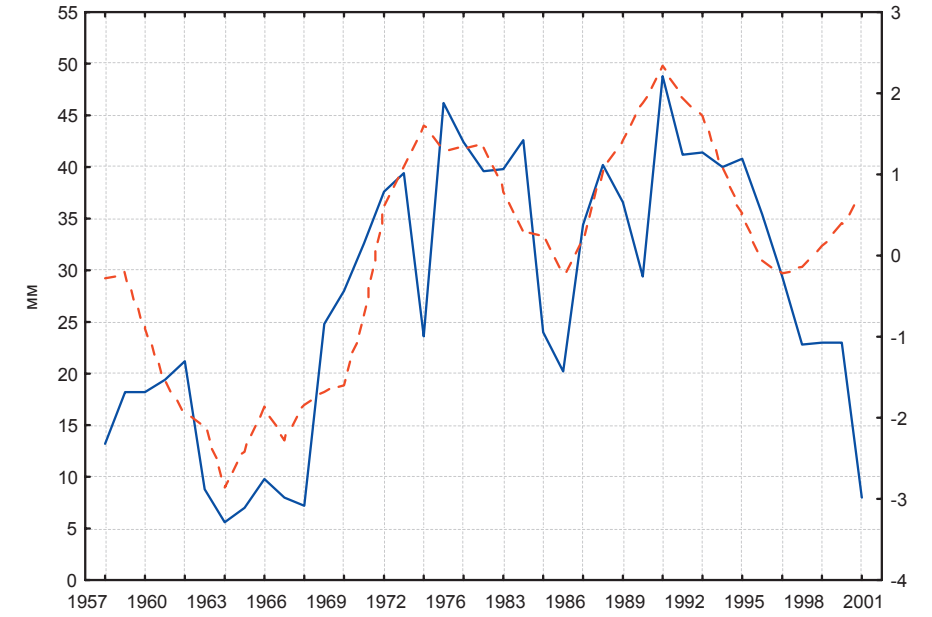


а

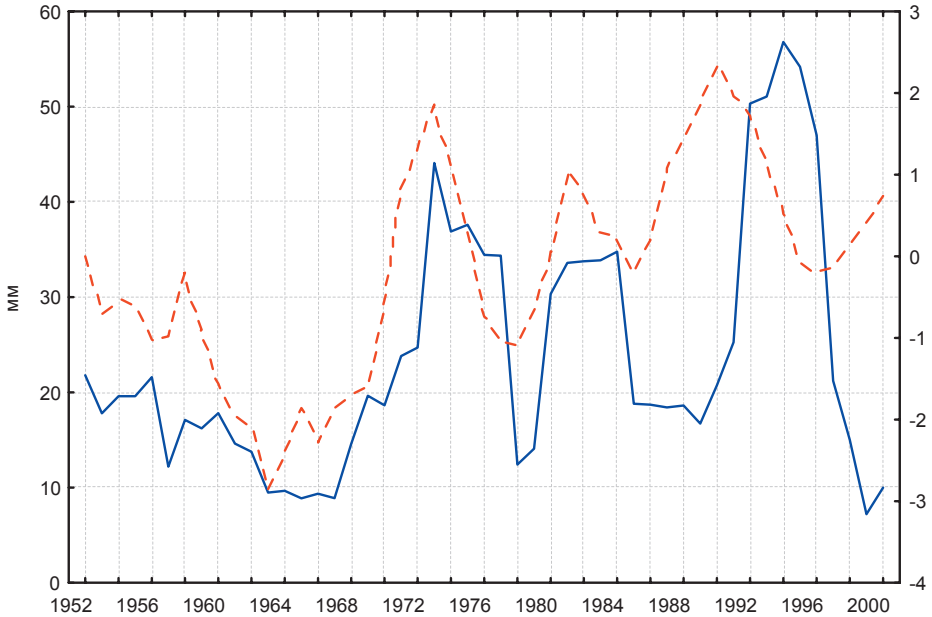


б

Рис. 6. Сопоставление пятилетних скользящих средних значении NAO (штриховая линия) с осадками за лета на станция Сана (*а*) со сдвигом на 2 года вперед и Таиз (*б*) (сплошная линия)

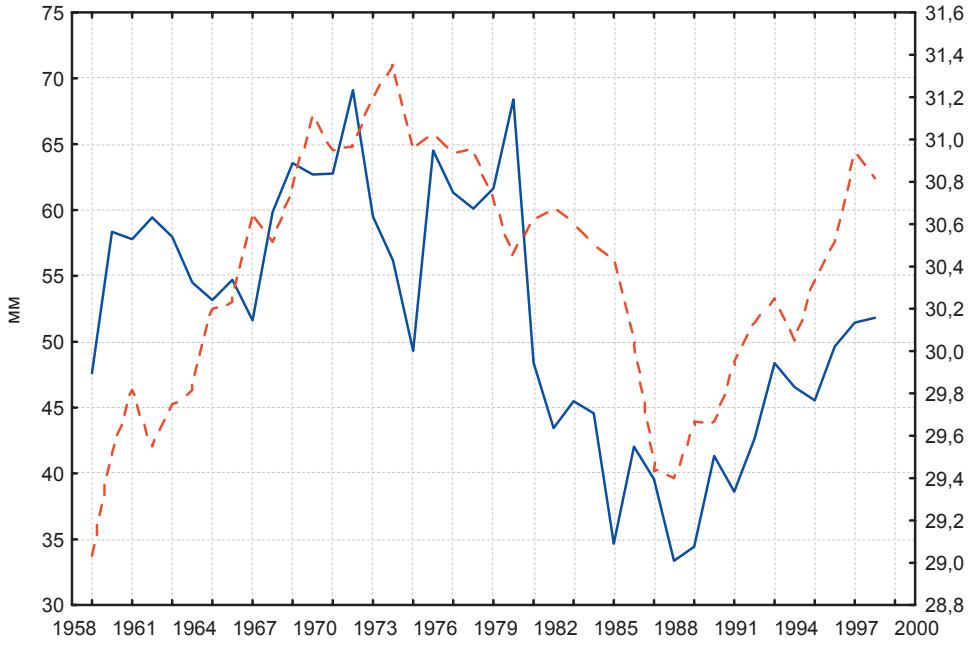


а

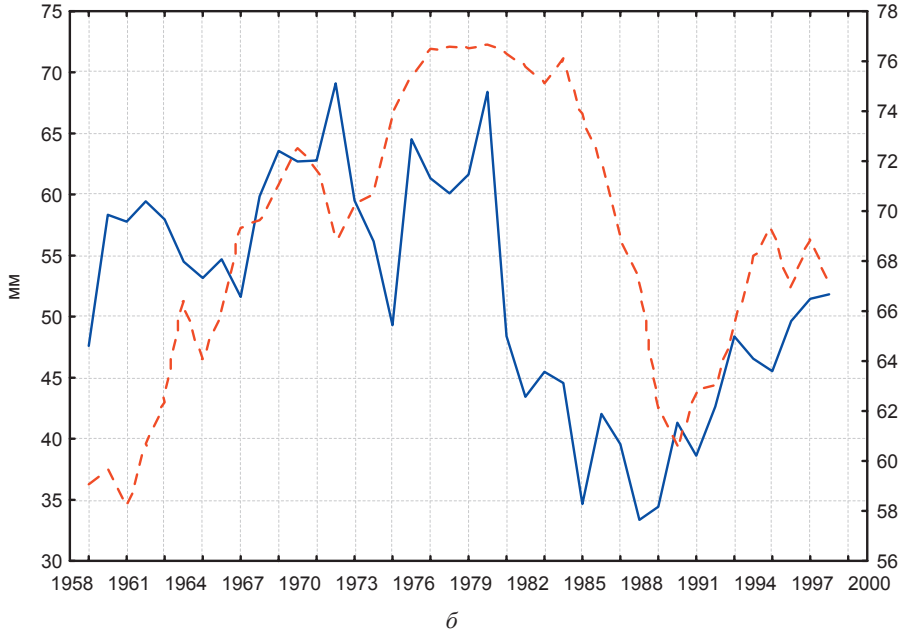


б

Рис. 7. Сопоставление пятилетних скользящих средних значении NAO (штриховая линия) с осадками за весну на станция Медина (*а*) и на станция Дахран (*б*) (сплошная линия)



а



б

Рис. 8. Сопоставление пятилетних скользящих средних значений осадков за летний период на станции Салала (штриховая линия) со среднегодовыми значениями широты (*а*) и долготы (*б*) центра Индоокеанского антициклона

– многолетний характер изменчивости выпадения осадков в центральной и северной частях полуострова и на его юго-западе прежде всего определяется изменениями в циркуляции атмосферы в Атлантическом регионе северного полушария, определяемыми индексом Северо-Атлантического колебания. При этом характер связи с Северо-Атлантическим колебанием на севере полуострова и на юго-западе является противоположным;

– количество осадков на южном побережье Йемена во многом зависит от летнего юго-западного муссона, который в зависимости от положения индоокеанского антициклона может захватывать в большей или уменьшая выпадающие осадки.

Литература

1. *Бабкин В.И. и др.* Северо-Атлантическое колебание и многолетняя динамика стока рек Европы / В сб.: "Современные проблемы гидрометеорологии". – СПб.: изд. РГГМУ, 1999, с. 114-121.
2. *Воротников М.В., Горшков В.Л.* Региональное проявление Солнечной активности на атмосферные процессы // Уч. зап. РГГМУ. 2008. № 8, с. 38-46.
3. Географический атлас, ГУГК. – М., 1980.
4. *Смирнов Н.П., Воробьёв В.Н., Кочанов С.Ю.* Северо-Атлантическое колебание и климат. – СПб.: изд. РГГМУ, 1998. – 121 с.
5. *Швер Ц.А.* Закономерности Распределения количества осадков на континентах. – Л.: Гидрометиздат, 1984. – 285 с.
6. *Patzert W.C.* Seasonal variations in structure and circulation the Red Sea. Hawaii, Journ. of Geophys., Univ. of Hawaii, 1972, 58p.

А.В. Бабкин, Х.А. Ислим

ОЦЕНКА ПЕРИОДИЧНОСТЕЙ В ИЗМЕНЕНИЯХ АТМОСФЕРНЫХ ОСАДКОВ, ВЫПАДАЮЩИХ НА ТЕРРИТОРИЮ ТУРЦИИ

A.V. Babkin, H.A. Esleem

ESTIMATION OF THE PERIODICITIES IN TIME SERIES OF ATMOSPHERIC PRECIPITATION OVER THE TERRITORY OF TURKEY

С использованием метода периодичностей проанализирован временной ряд атмосферных осадков, выпадающих на территорию Турции. В области высоких и средних частот колебаний осадков выявлены скрытые гармоники в их изменениях. Проведено сложение выявленных периодичностей. Их сумма преобразована в прогностическое выражение. Проведены расчеты поверочных долгосрочных прогнозов атмосферных осадков с заблаговременностью до 10 лет. Полученные результаты, проверенные на независимом материале, являются вполне удовлетворительными.

Ключевые слова: периодичности, долгосрочный прогноз, атмосферные осадки, территория Турции.

The time series of atmospheric precipitation over Turkish territory was analyzed by the method of periodicities. The hidden harmonics were revealed in the intervals of the high and intermediate frequencies of their variations. The revealed periodicities were summed. Their sum was developed into the forecast equation. The long range training forecasts of atmospheric precipitation with the lead time up to 10 years were computed. Their results, tested by the independent data, may be estimated as satisfactory.

Key words: periodicities, long-term forecast, atmospheric precipitation, territory of Turkey.

Введение

Атмосферные осадки, наряду с притоком вод с соседних территорий, являются важнейшим приходным элементом водного баланса отдельных государств. Их годовые суммы существенно колеблются во времени и зависят от географического положения территории, близости ее к океанам и морям, от циркуляции атмосферы, рельефа и многих других факторов.

Территория Турции характеризуется резкими контрастами климатических условий. В ее пределах выделяется шесть климатических районов с различными условиями увлажнения [Dewdney, 2008]. Во внутренних областях Турции выпадает за год около 300–400 мм атмосферных осадков. Количество осадков существенно увеличивается у побережий Черного, Мраморного, Эгейского, Средиземного морей и в горных районах. В наиболее увлажненном районе Турции, у побережья Черного моря, выпадает за год до 800 мм осадков.

На основании архива Global Historical Climatology Network на кафедре ДАКЗ РГГМУ получен непрерывный ряд средних годовых сумм атмосферных

осадков на территории Турции за 1929–2002 гг. Годовые суммы атмосферных осадков характеризуются значительной изменчивостью. Их наибольшие значения, наблюдавшиеся в 1929 и 1963 гг., равны соответственно 840 и 823 мм, а их минимумы (1932 и 1993 гг.) составляют 479 и 509 мм. Размах изменений осадков на территории Турции за рассматриваемый период достигает 361 мм.

В настоящей работе временной ряд осадков на территории Турции анализировался с 1929 по 1992 гг. Методом периодичностей [Бабкин, 2005; 2008] оценивались скрытые гармоники в его изменениях. Отрезок времени 1993–2002 гг. использовался для расчетов поверочных прогнозов и оценки их оправдываемости на независимом материале. С учетом выявленных периодов проводились расчеты поверочных прогнозов на пятилетия 1993–1997 гг. и 1998–2002 гг. и на весь поверочный интервал.

Долгосрочный годовой прогноз гидрометеорологической характеристики считается оправдавшимся, если разность предсказанного и наблюденного его значений не превосходит 0,674 от среднего квадратического отклонения его временного ряда [Апполов и др., 1974]. Прогноз на пяти и десятилетний интервалы может быть оценен по числу оправдавшихся годовых прогнозов и по сумме квадратов ошибок прогноза. Качество прогноза может быть также проверено при сопоставлении его результатов с прогнозом, полученным по среднему значению.

Представляет также определенный интерес прогнозирование средних за 5 и за 10 лет значений осадков с предварительно заданной погрешностью (например 10 %).

1. Метод оценки периодичностей временного ряда атмосферных осадков

Метод периодичностей основан на моделировании временного ряда стока суммой синусоид. Временной ряд атмосферных осадков аппроксимировался синусоидальными функциями последовательно с пошаговым изменением периода. При этом аппроксимация проводилась в трех диапазонах частот с соответствующим шагом периода. В области высоких частот, в интервале значений периода от 3 до 4 лет, шаг периода задавался равным 0,001; в диапазоне средних частот с периодами от 4 до 13 лет изменение периода задавалось с шагом 0,01: в области низких частот, с периодами более 13 лет, шаг изменения периода принимался равным 0,1.

При аппроксимации временного ряда синусоидальными функциями для каждого периода T методом наименьших квадратов [Линник, 1962] рассчитывались амплитуда $\Delta P/2$, фаза φ_P и дополнительное слагаемое P_0 наилучшей аппроксимирующей синусоиды, а также сумма ее квадратов разностей с рядом S_P. У некоторых периодов отмечаются локальные минимумы сумм квадратов разностей временного ряда и аппроксимирующей синусоиды. У этих периодов можно предполагать наличие признаков периодичности.

Для каждой синусоиды с минимумом суммы квадратов разностей со значениями временного ряда оценивалась ее корреляция с рядом наблюдений. При составлении прогностической модели ряда осадков из области высоких частот были отобраны синусоиды с минимумами сумм квадратов разностей, с корреляцей со значениями ряда не ниже 0,17, а из области средних частот - синусоиды с корреляцией не ниже 0,20.

2. Результаты анализа временного ряда осадков

В интервале времени 1929–1992 гг. среднее годовое значение осадков на территории Турции составило 646,8 мм/год, среднее квадратическое отклонение – 76,2 мм/год, допустимая ошибка прогноза 51,4 мм/год.

Параметры прогностических синусоид, выявленных с использованием метода периодичностей, представлены в табл. 1. Синусоиды расположены в порядке убывания их корреляции со значениями временного ряда.

Таблица 1

Синусоиды прогностической модели осадков на территории Турции

T, годы	P_0, мм/год	$\Delta P/2$, мм/год	φ_P, радианы	S_P, (мм/год)^2	r	Индекс
8,21	647,0551	39,8169	1,5561	319992,3	,3729	1
11,83	646,2059	36,4766	1,4627	329721,5	,3360	2
5,82	646,8224	32,7299	-1,0966	337418,7	,3036	3
9,66	646,6511	30,1877	3,3522	342012,2	,2826	4
7,15	646,7625	23,4516	1,5407	354013,4	,2181	5
3,410	646,5577	20,5188	2,3121	358397,1	,1891	6
3,039	646,8418	20,3927	1,9855	358437,3	,1888	7
3,210	646,7541	18,8020	,5544	360409,6	,1742	8
3,935	646,7599	18,8415	1,5245	360496,3	,1735	9
3,938	646,7667	18,8427	3,9259	360497,3	,1735	10

Установленные синусоиды соответственно складывались. При их сложении корреляция их сумм и значений временного ряда монотонно возрастала. Корреляция суммы 5 синусоид из диапазона средних частот и временного ряда составляет 0,555, а корреляция суммы из 5 высокочастотных синусоид и значений временного ряда равна 0,248. Корреляция суммы высокочастотных и среднечастотных синусоид и значений временного ряда равна 0,610.

Изменение осадков на территории Турции, а также сумма прогностических синусоид, представлены на рис. 1. Прогностические оценки получены при продлении суммы синусоид на интервал поверочного прогноза. На графике также показана гармоника из диапазона низких частот. Ее период составляет примерно 41 год, а корреляция со значениями ряда порядка 0,25.

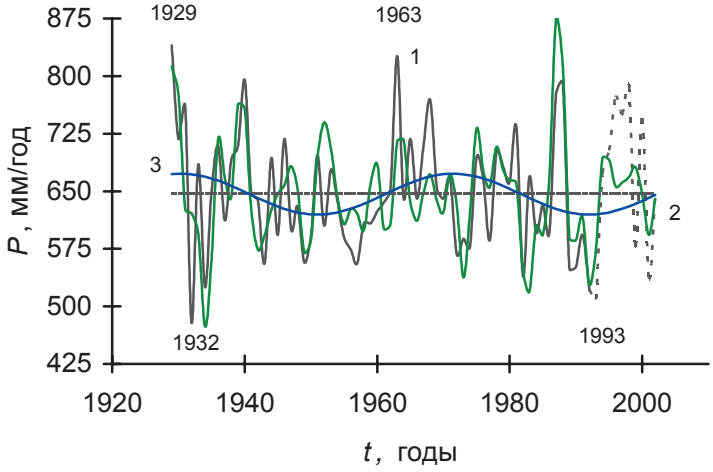


Рис. 1. Изменения атмосферных осадков, выпадающих на территорию Турции,
1 – данные наблюдений (пунктиром показан поверочный интервал 1993 – 2002 гг.),
2 – сумма высокочастотных и среднечастотных синусоид, 3 – синусоида с периодом 41 год

3. Оценка оправдываемости прогноза атмосферных осадков территории Турции

В первый поверочный интервал 1993–1997 гг. прогноз оправдался 2 раза. Верные значения осадков предсказаны на 1994 и 1995 гг. На втором поверочном интервале значения осадков предсказаны верно только в 2002 г. За весь поверочный интервал прогноз оправдался в трех случаях. Суммы квадратов ошибок прогноза за поверочные интервалы 1993–1997 и 1998–2002 гг. оказались равными соответственно 25 864 (мм/год)^2 и 37 439 (мм/год)^2, а за весь поверочный интервал – 63 303 (мм/год)^2.

Прогноз осадков, полученный по среднему значению, оправдался только в двух случаях – в 1994 и в 2002 гг. Сумма квадратов ошибок прогноза на всем десятилетнем интервале составила 95 218 (мм/год)^2: 49 406 (мм/год)^2 за 1993–1997 гг. и 45 812 (мм/год)^2 за 1998–2002 гг.

Учет в прогностической сумме 41-летней синусоиды ведет к снижению оправдываемости поверочного прогноза до уровня результатов, полученных по среднему значению.

Средние значения поверочных прогнозов на 1-е и 2-е пятилетия и весь поверочный интервал составили соответственно: 682, 659 и 670 мм/год. Средние значения осадков, выпавших на территорию Турции за эти отрезки времени равны 655, 646 и 650 мм/год. Разности средних спрогнозированных и наблюденных атмосферных осадков на интервалах поверочных прогнозов оказались равными 27, 13 и 20 мм/год.

Заключение

Временной ряд атмосферных осадков, выпадающих на территорию Турции, проанализирован с использованием метода периодичностей. В изменениях осадков выявлены гармоники с периодами 11,83; 9,66; 8,21; 7,15; 5,82; 3,938; 3,935; 3,410; 3,210; 3,039 лет. У этих гармоник отмечаются минимумы сумм квадратов разностей их и ряда осадков в зависимости от периода аппроксимации.

Проведено сложение синусоид с установленными периодами. Суммы синусоид и временной ряд осадков над территорией Турции обнаружили корреляцию, достаточную для проведения прогностических расчетов. Были получены прогностические оценки этих характеристик на десятилетнем поверочном интервале (1993 – 2002 гг.), которые проверялись на независимом материале.

Несмотря на то, что только 3 значения из 10 оказались предсказаны верно, результаты прогностических расчетов оказались несколько лучше прогноза по среднему значению. Довольно успешными оказались прогнозы средних значений на 5 и на 10 лет вперед. Разности спрогнозированных и фактических средних значений не превышают 5 % от среднего многолетнего значения осадков, выпавших на территорию Турции за 1929–1992 гг. и 7,5 % от размаха их изменений.

Литература

1. *Аполлов Б.А., Калинин Г.П., Комаров В.Д.* Курс гидрологических прогнозов. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 419 с.
2. *Бабкин А.В.* Усовершенствованная модель оценки периодичности изменений уровня и элементов водного баланса Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 2005. № 11, с. 63-73.
3. *Бабкин А.В.* Методика долгосрочного прогноза уровня Ладожского озера и стока р. Невы // Уч. зап. РГГМУ. 2008. № 8, с. 31-37.
4. *Линник Ю.В.* Метод наименьших квадратов. – М.: Наука, 1962. – 350 с.
5. *Dewdney J.C.* Turkey // Encyclopedia Britannica, 2008 (DVD publication).

Работа выполнена при поддержке грантов: Президента Российской Федерации (МД-3616.2008.5) и РФФИ (07-05-00465).

ЭКОЛОГИЯ

В.А. Шелутко, Е.С. Смыжова

ДИНАМИКА СТОКА БИОГЕННЫХ ВЕЩЕСТВ ПО РЕКЕ ВЕЛИКАЯ В ПСКОВСКО-ЧУДСКОЕ ОЗЕРО

V.A. Shelutko, E.S. Smyzhova

DYNAMICS OF NUTRIENTS FLOW ALONG THE VELIKAYA RIVER IN TO THE PSKOVSKO-CHUDSKOE LAKE

Работа посвящена вопросам определения объемов стока биогенных веществ по р. Великая на основе применения методов расчета средних годовых концентраций, учитывающих особенности первичной гидрохимической информации. Показано, что в отдельные годы погрешности расчетов средних годовых концентраций и годовых объемов стока за счёт неучёта особенностей гидрохимической информации могут достигать 100 и более процентов.

Ключевые слова: объемы стока, среднегодовая концентрация, водность, неэквидистентность, биогены.

In this work is considering questions of nutrient flow quantity estimation along the Velikaya River on the base of applying of annual concentrations calculation methods which take in to account features of initial hydrochemical data. It is shown that in independent years the mistakes of calculation of annual concentrations and annual flow quantity without taking in to account features of hydrochemical information can reach 100 and more percent.

Key words: flow quantity, annual concentration, water discharge, no equidistant, nutrients.

Введение

Геоэкологические исследования по определению антропогенной нагрузки на водные объекты во многом опираются на имеющиеся данные гидрохимических наблюдений. До 1989 г. эти данные публиковались в ежегодниках и были доступны всем исследователям. После 1989 г. публикуются данные только о среднегодовых концентрациях загрязняющих веществ (ЗВ), рассчитанных по результатам первичных гидрохимических наблюдений. Поэтому именно среднегодовые концентрации ЗВ используются в настоящее время в большинстве случаев как для характеристики экологического состояния рек и водоёмов, так и для оценки динамики развития процессов загрязнения во времени. В частности по этим данным обычно рассчитывается годовой сток ЗВ, поступающий по притокам в реки и водоемы.

Методика расчёта среднегодовых концентраций ЗВ по гидрохимическим наблюдениям, принятая в настоящее время, основана на следующих теоретических предположениях: 1) временные ряды измеренных значений концентраций ЗВ в каждом пункте наблюдений описываются моделью в виде ряда значений случайной величины; 2) данные ряды наблюдений являются стационарными, регулярными и однородными.

В последние годы выявилось, что при анализе средних годовых концентраций, рассчитанных на этой основе, могут быть получены противоречивые результаты, не имеющие какого-либо физического объяснения. [Торопова, 2003; Шелутко, Колесникова 2008]. В связи с этим возник вопрос о репрезентативности и надёжности расчётов среднегодовых концентраций ЗВ существующими методами. В выполненных затем исследованиях было показано, что гидрохимические наблюдения, в том числе наблюдения на реке Великой, имеют ряд особенностей, которые не укладываются в рамки рассмотренных выше теоретических положений, а именно:

– количество измерений концентраций ЗВ в году может изменяться от 1 до 12. Следовательно, исходные ряды данных наблюдений являются неоднородными по количеству внутригодовых наблюдений.

– значения концентраций в значительной степени зависят от расходов воды на момент отбора пробы и, следовательно, являются неоднородными по условиям своего формирования.

– интервалы между измерениями концентраций ЗВ не равны между собой. Таким образом, исходные ряды данных наблюдений являются неэквидистентными, то есть неоднородными во времени.

– в последовательностях значений измеренных концентрации наблюдаются выбросы, то есть возможные, но непредставительные для данной выборки значения [Афифи, Эйзен, 1982]. Наличие таких значений может определяться несколькими причинами, к ним можно отнести: ошибки в измерениях, аварийные сбросы загрязненных вод и влияние природных факторов.

Целью данной работы является исследование динамики стока биогенных веществ по реке Великой и влияния особенностей гидрохимической информации на результаты этих расчётов

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

- определить необходимое направление исследований для учёта особенностей гидрохимической информации;
- исследовать влияние учета водности реки, неэквидистентности исходных данных и наличия выбросов на точность определения среднегодовых концентраций и объемов стока ЗВ;
- разработать методы учета особенностей гидрохимической информации для повышения точности расчетов среднегодовых концентраций и объемов стока ЗВ;

- исследовать динамику стока биогенных веществ в Псковско-Чудское озеро с учетом и без учета особенностей гидрохимической информации.

При решении этих задач использовались данные наблюдений Северо-Западного Управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (СЗУГМС) по гидрологическому и гидрохимическому режиму в верхнем и нижнем створах, расположенных на реке Великая в пункте Псков, за период с 1969 по 2002 годы. Следует отметить, что выбор объекта исследования во многом определялся наличием первичных данных наблюдений.

1. Оценка влияния водности рек на точность расчёта среднегодовой концентрации загрязняющих веществ

Для оценки среднегодовых концентраций ЗВ в реках в основном используются два метода [Орлов, 1988]. В первом методе учитывается водность реки в период взятия пробы воды на анализ, и среднегодовая концентрация рассчитывается как средневзвешенное по водности значение,

$$\overline{S}_j = (\sum_{i=1}^{nj} S_{ji} \times Q_{ji}) / \sum_{i=1}^{nj} Q_{ji}, \qquad (1)$$

где $\overline{S}_j$ – средняя годовая концентрация загрязняющего вещества в j-й год; n_j – число измерений концентраций в j-й год; i – номер измерения концентраций и расходов воды в данном году (i = 1,2,…, n_j); S_{ji} и Q_{ji} – i-е значение соответственно концентраций и расходов воды в j-й год.

Во втором методе величина средней годовой концентрации определяется как среднее арифметическое значение концентраций по всем измеренным значениям в год:

$$\overline{S}_j = (\sum_{i=1}^{nj} S_{ji}) / n. \qquad (2)$$

В практике геоэкологических расчётов наибольшее распространение получил второй метод. Это связано с тем, что взятие проб воды в реках для химического анализа часто не сопровождается измерениями расходов воды. Кроме того, большинство учёных сходиться во мнении, что учёт водности не оказывает существенного влияния на результаты расчётов среднегодовой концентрации. Между тем, второй метод имеет достаточно существенное ограничение, а именно он может применяться только в тех случаях, когда расходы воды в течение года на рассматриваемом объекте являются постоянными [Шелутко, Колесникова, 2008]. В связи с этим возникает вопрос: как влияет неучёт внутригодовых колебаний водности по формуле (2) на точность оценки среднегодовых концентраций ЗВ?

Для ответа на этот вопрос были сопоставлены результаты расчёта среднегодовых концентраций первым и вторым методом. Отклонения среднегодовых концентраций, рассчитанных принятым методом S_{ai}, от значений, рассчитанных

с учётом водности – S_{ci} принимались в качестве погрешностей расчётов (Δ_i) среднегодовых концентраций за счёт неучёта водности

$$\Delta_i = S_{ai} - S_{ci}. \quad (3)$$

В качестве относительной погрешности принималось отношение:

$$\delta_i = (\Delta_i / S_{ci})100\%. \quad (4)$$

Значения Δ_i и δ_i были рассчитаны по всем исходным рядам, для которых имелись данные о расходах воды в период взятия проб.

Результаты расчётов погрешностей среднегодовых концентраций по формулам (3) и (4) для каждого отдельного года по всем исходным рядам наблюдений сводились в специальные таблицы. В качестве примера в табл. 1 представлена выборка результатов таких расчётов по р. Великая в пункте Псков (нижний створ) для ряда значений концентраций аммонийного азота.

Таблица 1

Вычисление погрешностей расчета средних годовых концентраций аммонийного азота за счёт неучёта водности, р. Великая – п. Псков (н. створ)

Год	Sai	Sci	Δ	|δ|,%
1969	0,53	0,75	-0,216	29
1970	0,5	0,66	-0,160	24
1973	0,48	0,54	-0,056	10
1976	0,37	0,25	0,124	50
1981	0,033	0,03	0,005	18
1982	0,01	0,00	0,006	123
1984	0,025	0,02	0,003	16
1985	0,023	0,01	0,009	68
1986	0,03	0,02	0,007	30
1987	0,008	0,007	0,001	7
1988	0,02	0,01	0,006	43
1993	0,01	0,01	0,000	0
1996	0,08	0,04	0,030	68
1998	0,02	0,02	0,002	10
1999	0,03	0,02	0,000	1

Как следует из полученных результатов, значения погрешностей расчета средних годовых концентраций ЗВ в реках за счёт неучёта водности в отдельные годы могут быть весьма значительны. Так, погрешности расчетов средних арифметических значений концентраций по отношению к средним взвешенным по водности варьируют от 0 до +576 % (1987 г., аммонийный азот, р. Великая – г. Псков, верхний створ). Таким образом, неучёт водности при расчётах средних годовых концентраций приводит к погрешностям в 2, 3, а иногда и в 5 раз превышающих действительные значения этих концентраций.

Следует отметить, что средние многолетние значения при различных способах расчёта отличаются незначительно. Так для общего железа в верхнем створе среднее многолетние значение за исследуемый период составило 0,13 мг/л при расчёте без учёта водности, и 0,12 мг/л при расчёте с учётом водности. Более существенно изменились коэффициенты вариации. Так по железу значение коэффициента вариации снизилось с 0,77 (расчёт принятым методом) до 0,72 (расчёт с учётом водности).

Исходя из проведенного анализа, следует, что во избежание крупных просчетов при оценке средних годовых концентраций ЗВ, и для уточнения средних многолетних значений и значений редкой повторяемости во всех случаях при расчётах средних годовых концентраций ЗВ необходим учёт водности в период взятия проб на химанализ. Проблема здесь заключается в том, что часто, особенно на малых реках, во время взятия проб воды для проведения химического анализа измерения расходов воды не проводятся.

При отсутствии измерений расходов воды в период отбора проб, проблема учёта водности решилась бы при наличии надёжной связи концентрации ЗВ и расходов воды. Однако, взаимосвязь химического состава речного стока с величиной расходов воды имеет довольно сложный характер. В условиях высокой антропогенной нагрузки такая связь вообще часто нарушена. По-видимому, требуется другой, более общий подход, позволяющий, хотя бы приближенно учитывать при расчёте среднегодовых концентраций ЗВ в реках внутригодовые колебания водности.

В частности, нами был апробирован метод, заключающийся в использовании типовых суточных гидрографов по однородным районам, а так же использование рек аналогов. Этот путь, по крайней мере для Северо-Запада, оказался достаточно эффективным. Он позволяет, при надлежащем анализе, сократить возможные погрешности определения средних годовых концентраций в 1,5–2 раза [Колесникова, 2008]. Таким образом, для уточнения расчетов средних годовых концентраций если по каким-либо причинам данные наблюдений за расходом воды на момент взятия проб отсутствует, можно применять метод типового гидрографа или использовать реку-аналог.

Выводы

1. Неучет водности при определении средних годовых концентраций может привести к крупным погрешностям их расчета.

2. За многолетний период эти просчеты частично нивелируются, но по-прежнему остаются очень большие.

3. Поэтому учет водности при расчетах средних годовых концентраций ЗВ является обязательным.

4. Для расчета средних годовых концентраций ЗВ при отсутствии непосредственных измерений расходов воды в период отбора проб на химанализ необходимо использовать типовой гидрограф стока в модульных коэффициентах, рассчитанный для данного района, или гидрограф стока реки аналога.

2. *Влияние учёта неэквидистентности исходных рядов наблюдения на точность расчёта среднегодовой концентрации*

Расчёт среднегодового значения концентраций как среднего арифметического или средневзвешенного значения может производиться в том случае, если каждое наблюдение освещает одинаковый временной интервал, то есть ряд наблюдений является эквидистентным. Ряды гидрохимических наблюдений на реках, как отмечалось выше, являются неэквидистентными (НЭ).

Для учёта данной особенности исходных рядов наблюдений была разработана методика расчёта среднегодовой концентрации ЗВ которая учитывает неравные временные интервалы между отборами проб на гидрохимический анализ [Смыжова, Шелутко, 2010].

$$\overline{S}_j = \frac{\sum_{1}^{n-1} \overline{S}_{j,i}\Delta t + S_{j,j-1}\Delta t + S_{j,j+1}\Delta t}{t}, \qquad (5)$$

где $\overline{S}_{j,i} = \frac{S_{ji} + S_{j,i+1}}{2}$ – среднее значение концентрации между двумя соседними измерениями в *J*-м году; $S_{j,j-1} = \frac{S_{j,1} - S_{j-1,n}}{2}$ – средняя концентрация между последним значением в $j - 1$ году и первым значением в *j*-м году; $S_{j,j+1} = \frac{S_{j+1,1} + S_{j,n}}{2}$ – средняя концентрация между последним значением в *j*-м году и первым значением в $j + 1$-м году, $\Delta t = t_{i+1} - t_i$ – временной интервал между соседними измерениями концентрации; t – число дней в году; n – число измерений концентраций в данном году.

Для оценки влияния учёта неэквидистентности на точность расчёта среднегодовых концентраций ЗВ по имеющимся рядам наблюдений был произведён расчёт среднегодовых концентраций по формулам (5) и (2). Для более наглядного представления расхождений в расчётах также были рассчитаны абсолютные (Δ) и относительные (δ) погрешности по аналогии с формулами (3) и (4). В данном случае S_{ai} – среднегодовая концентрация, рассчитанная без учёта НЭ, а S_{ci} – среднегодовая концентрация, рассчитанная с учётом НЭ.

В качестве примера в табл. 2 представлен результат расчёта среднегодовых концентраций нитритного азота ($N\text{-}NO_2$). Как следует из всех полученных данных, возможные ошибки определения среднегодовых концентраций $N\text{-}NO_2$ в результате неучёта неэквидистентности исходного ряда наблюдений в отдельные годы составляют от 0 до 183 %. Аналогично по другим рядам наблюдений возможные погрешности за счёт неучёта неэквидистентности составляет от 0 до 183 %.

Таблица 2

Средние годовые и средние взвешенные по временному интервалу значения концентрации $N\text{-}NO_2$, р. Великая – г. Псков, верхний створ

Год	Sai	Sci	Δ	δ, %
1973	0,017	0,006	0,011	183
1974	0,007	0,005	0,002	40
1975	0,007	0,003	0,004	133
1976	0,0025	0,0033	-0,0008	24
1977	0,008	0,006	0,002	33
1978	0,0053	0,0045	0,0008	18
1979	0,006	0,0059	0,0001	2
1980	0,003	0,012	-0,009	75
1981	0,032	0,019	0,013	68
1982	0,013	0,023	-0,01	43
1984	0,031	0,02	0,011	55
1987	0,007	0,006	0,001	17

Таким образом, было установлено, что в некоторых случаях значения Δ сопоставимы со значениями концентраций, что говорит о значительной разнице в значениях концентраций, полученных разными способами расчёта. Так для некоторых значений величина относительной погрешности δ была близка к 100 %. При сравнении среднемноголетних значений концентрации было выявлено, что в большинстве случаев учёт неэквидистентности приводит к снижению средних многолетних концентраций, но не значительно. Гораздо большее снижение характерно для значений коэффициента вариации рядов среднегодовых концентраций, рассчитанных с учётом и без учёта НЭ. Так, например, для нитратного азота на нижнем створе среднее многолетнее значение при стандартном способе расчёта составило 0,5 мг/л, а коэффициент вариации – 0,7, тогда как при учёте НЭ эти значения составляют 0,47 мг/л и 0,65 соответственно.

Таким образом, для повышения точности расчёта среднегодовой концентрации необходимо учитывать неэквидистентность исходной гидрохимической информации. К сожалению, для этого необходимо располагать первичными данными наблюдений, которые, как уже отмечалось выше, в данное время недоступны для исследователей.

Выводы

1. Неучёт неэквидистентности может привести к большим погрешностям в оценке средних годовых концентраций.

2. Для учета неэквидистентности можно использовать предложенную выше расчетную формулу.

3. Обязательными элементами расчетной формулы являются данные измерений концентрации в водоемах и водотоках.

4. Оценка влияния исключения выбросов в исходных рядах на точность расчёта среднегодовой концентрации ЗВ

Первичные исследования исходных рядов наблюдений за концентрациями биогенных элементов на р. Великая в пункте Псков показали, что практически в каждом временном ряду измеренных значений концентрации имеются значения, существенно отличающиеся от всех других так называемые выбросы. Как уже отмечалось выше, наличие таких значений может определяться несколькими причинами, к ним можно отнести: ошибки в измерениях, аварийные сбросы загрязненных вод и влияние природных факторов.

Режим загрязнения водных объектов складывается из влияния трёх групп факторов [Шелутко, 2002].

1. Регулярное и постоянное воздействие человеческой деятельности.
2. факторы, связанные с аварийными выбросами загрязняющих веществ.
3. факторы, связанные с неблагоприятными гидрометеорологическими явлениями.

Первая группа факторов определяет общий режим загрязнения водного объекта, а факторы 2 и 3 группы приводят к появлению в исходных рядах наблюдений экстремальных значений или т.н. выбросов. Таким образом, можно с достаточной степенью уверенности утверждать, что ряды наблюдений при исключении выбросов описывают процесс загрязнения речного стока при регулярном и постоянном антропогенном воздействии, когда все предприятия-водопользователи в бассейне рассматриваемой реки работают по заданному графику в нормальном режиме. При этом выбросы, скорее всего, отражают поступление загрязняющих веществ в каких-то экстремальных условиях, чаще всего связанных с аварийными сбросами предприятий или стоком веществ с территории речного бассейна в экстремальных гидрометеорологических условиях. Продолжительность таких аварийных сбросов как правило незначительна, поэтому включение их в расчеты средних годовых и средних многолетних концентраций наряду с основными данными, не правомерно.

Выявление выбросов в исходных рядах измеренных значений концентраций ЗВ производилось по совмещенным графикам теоретических и эмпирических кривых обеспеченности. При этом было установлено, что на большинстве из них имеется от одной до 3–5 эмпирических точек резко отклоняющихся, как от теоретической кривой обеспеченности, так и от основной группы эмпирических точек. Попытка подобрать теоретический закон распределения, описывающий эти точки, не увенчалась успехом, так как не удалось подобрать ни один из возможных теоретических законов, который одновременно описывал бы и отскакивающие точки, и основную часть ряда. [Сабинин, Шелутко, 2007].

Из этого можно сделать вывод о том, что точки, которые не ложатся на теоретическую кривую обеспеченности, не соответствуют общему закону распределения основной массы данных наблюдений, а исходные ряды данных наблюдений являются, скорее всего, неоднородными по своему генезису. Сами

аномальные точки (выбросы) являются либо грубыми ошибками, либо реально существующими экстремально высокими значениями показателей качества воды, охватывающими непродолжительный период времени [Торопова, 2003].

Для статистической проверки предположения о наличии выбросов в рядах наблюдений был использован критерий Диксона, вычисляемый по ранжированному в возрастающем порядке ряду.

$$r_{i,j} = \frac{x_n - x_{n-1}}{x_n - x_1}, \qquad (6)$$

где x_n – максимальное значение ряда; x_{n-1} – предыдущее значение ряда; x_1 – первый член ряда.

Критерий Диксона имеет существенное ограничение: количество выбросов в исследуемом ряду должно быть не больше двух. Это ограничение можно обойти, исключая из ряда уже выявленный выброс и исследуя оставшуюся часть выборки. Однако, результаты анализа, полученные в этом случае сдедует считать приближёнными [Шелутко, 2002].

Исходя из результатов расчетов по критерию Диксона наибольшее количество выбросов присутствует в рядах измеренных концентраций NO_2: 7 значений в пункте Псков – нижний створ; 3 значения пункте Псков – верхний створ. В рядах концентраций общего железа ($Fe_{общ}$) – всего 5 выбросов. В рядах концентраций NH_4 было выявлено 6 выбросов, в рядах концентраций NO_3 было выявлено 2 значения выбросов.

Для более точного определения наличия выбросов в рядах наблюдений был проведён также анализ связи значений концентраций биогенов между соседними створами. При этом анализировались точки выходящие в критические области уравнения регрессии значений концентраций за соответствующие даты на соседних створах.

При анализе связи значений концентрации было выявлено несколько большее количество выбросов, чем по критерию Диксона, а именно: в рядах концентраций NH_4 – больше на одно значение в пункте наблюдений Псков – верхний створ; в рядах концентраций $Fe_{общ}$ – больше на одно значение в пункте наблюдений Псков – нижний створ.

Из полученных результатов видно, что, несмотря на ограничения использования критерия Диксона, результаты расчётов по нему согласуются с результатами, полученными при использовании уравнения линейной регрессии. Следовательно, можно предположить, что данные результаты соответствуют реальной ситуации. Таким образом, для более точного определения наличия выбросов в рядах наблюдений за концентрациями ЗВ целесообразно использовать сочетания двух методов: критерия Диксона и анализа связи значений между створами.

В общем, проведенное исследование показывает, что существуют достаточно достоверные способы оценки и исключения из исходных рядов выбросов.

В свою очередь, исключение выбросов (В данном случае это одно или два–три значения в несколько раз превышающие предшествующие значения) из исходных рядов позволяет оценить загрязнение водного объекта при регулярном и постоянном антропогеном воздействии.

Для оценки влияния выбросов на результаты расчёта среднегодовых концентраций ЗВ были произведены расчёты до и после исключения выбросов. Пример такого расчёта представлен в табл. 3.

Таблица 3

Расчёт среднегодовой концентрации с учётом и без учёта выбросов в исходных рядах наблюдений

Год	$S_{сред}$	$S_{выб}$	Δ	|δ|, %
аммонийный азот, п. Псков – н. створ				
1974	0,72	0,43	0,29	68
1978	0,99	0,63	0,37	58
нитритный азот, п. Псков – н. створ				
1971	0,02	0,003	0,02	500
1973	0,028	0,024	0,00	17
1975	0,075	0,020	0,06	275
1984	0,084	0,019	0,07	342
железо общее, п. Псков – н. створ				
1975	0,2	0,103	0,10	94
1977	0,263	0,110	0,15	139
1981	0,288	0,123	0,16	134
1985	0,433	0,190	0,24	128

Как видно из представленного примера, исключение выбросов из исходных рядов измеренных значений концентраций существенно сказывается не только на результатах оценки средних годовых концентраций, но и на результатах расчёта среднего многолетнего значения и коэффициента вариации концентраций ЗВ. При этом происходит значительное снижение этих характеристик. Например, для нитритного азота в верхнем створе среднее многолетнее значение до исключения выбросов и после исключения составило 0,009 мг/л и 0,006 мг/л соответственно. Коэффициент вариации снизился с 0,90 до 0,46.

Естественно встает вопрос: насколько обосновано исключение выбросов, не приведет ли это к искусственному занижению среднегодовых концентраций и годовых объемов стока? При решении этого вопроса следует исходить из следующих соображений: выбросы, вызванные аварийными сбросами ЗВ, продолжаются, как правило, не больше двух-трех дней. При включении же их в расчет среднегодовых концентраций, при числе измерений в год от 4 до 12, им искусственно приписывается продолжительность соответственно от трех до одного месяца, что и вызывает резкое и необоснованное завышение средних годовых концентраций. В дальнейшем необходимо более детально проанализировать влияние выбросов на результаты расчёта среднегодовых концентраций и коэффициентов вариации путем приписывания выбросам продолжительности в 1, 2 и 3 дня.

Выводы

1. При оценке объемов стока загрязняющего вещества в каждом пункте наблюдений необходимо проводить анализ всей имеющейся последовательности измерений концентраций ЗВ.

2. Необходимо учитывать, что режим и степень загрязнения природной среды на урбанизированных территориях определяются тремя группами факторов:

– факторы, связанные с регулярным и постоянным антропогенным воздействием, создающим общий пространственно-временной фон загрязнения объектов природной среды;

– факторы, связанные с аварийными сбросами ЗВ, которые накладывают на общий пространственно-временной фон нерегулярные и ограниченные во времени всплески загрязнения;

– факторы, связанные с экстремальными гидрометеорологическими условиями.

3. При оценке и расчете химического загрязнения необходимо проводить декомпозицию данных наблюдений на две составляющие, определяющие состояние водных объектов в условиях регулярного и постоянного антропогенного воздействия и в аварийных условиях.

4. Включение в общий ряд наблюдений аварийных выбросов может привести к весьма существенному преувеличению сброса загрязняющих веществ через данный створ.

Анализ динамики стока биогенных элементов по реке Великая

Анализ временной динамики поступления биогенов в Псковско-Чудское озеро с водами реки Великой показал, что наибольший вклад в загрязнение по средним многолетним данным вносит нитратный азот (в среднем 2170 т/год). Также значительный вклад в загрязнение вносят аммонийный азот (947 т/год) и общее железо (703 т/год).

Объем стока аммонийного азота в период с 1969 по 2002 г. имеет четко выраженную тенденцию изменения. Временное распределение объемов стока идентично на верхнем и нижнем створе, однако значения объемов стока на Нижнем створе (на выходе из города) больше, чем на верхнем створе. Это можно объяснить влиянием города Пскова, чьи сточные воды попадают в реку. В период с начала 1980-х до конца 1990-х значительных изменений в объеме стока аммонийного азота не наблюдалось. В последние годы (1999–2002) наблюдается тенденция его увеличения. Максимальные значения на обоих створах пришлись на 1978 г. Следует отметить, что при расчёте среднегодовых концентраций без учёта водности и неэквидистентности погрешность расчетов концентрации аммонийного азота в нескольких случаях превышает 100 %. В среднем, погрешность за счёт неучета водности составляет около 50 %, а за счёт неучёта неэквидистентности около 20 %.

Для объемов стока нитратного азота характерно, что до начала 1990-х годов наблюдается их увеличение, затем после начала 1990-х резкий спад. В последние годы наблюдается тенденция незначительного увеличения.

В рядах наблюдений за нитритным азотом на нижнем створе наблюдаются значительные пробелы исходных данных, следовательно, достоверно оценить динамику на данном створе невозможно. На верхнем створе для объема стока нитритного азота характерна та же динамика, что и для других форм азота. Так же, как и в других случаях, способ расчёта среднегодовой концентрации и последующая оценка на её основе объема стока сказывается на результатах. При использовании различных методов мы можем получить противоречивые выводы.

Для значений объемов стока общего железа характерно скачкообразное изменение значений, поэтому чёткой динамики за период с 1969 по 2002 г. не прослеживается.

Значения объемов стока минерального фосфора в нижнем створе значительно больше, чем в верхнем створе. Например, в 2000 г. объем стока на верхнем створе составил 33 т/год, а на нижнем – 85 т/год. Таким образом, можно предположить, что город Псков оказывает существенное влияние на содержание минерального фосфора в воде. На верхнем створе максимальный объем при любом способе расчёта среднегодовой концентрации приходиться на 1981 г., а на нижнем таких пиков два: в 1989 и 1998 гг. На верхнем створе прослеживается четкая тенденция изменения объемов стока, характерная и для других веществ. Для нижнего створа данная тенденция не достаточно ярко выражена.

В общем можно сделать вывод, что в большинстве случаев для динамики объемов стока характерно увеличение значений до начала 1990-х, а затем последующее их снижение. Также в последние исследуемые годы заметна тенденция к увеличению объемов стока биогенов, но при этом объемы стока не достигаю значений, характерных для конца 1980-х годов. Важно отметить, что на точность расчёта объемов стока влияет корректный расчёт среднегодовой концентрации. Так, при неучёте особенностей гидрохимической информации в расчётах среднегодовой концентрации и, следовательно, в расчёте объема стока могут быть допущены серьезные ошибки, которые могут привести к неправильным выводам при оценке динамики загрязнения реки Великой (рис. 1)

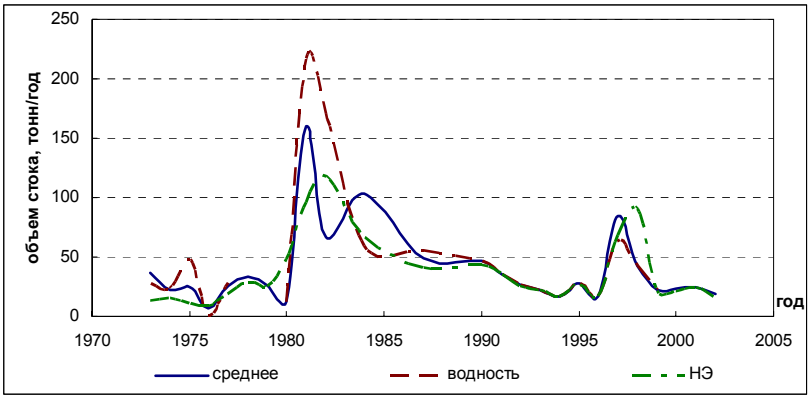


Рис. 1. Временная динамика объема стока нитритного азота р. Великая – г. Псков (в. створ)

Рассмотрим теперь влияние отдельных особенностей гидрохимической информации на расчёт объемов стока.

Для выявления степени влияния неучёта водности при расчёте среднегодовой концентрации на оценку объемов стока был произведён расчёт с использованием концентраций, рассчитанных с учётом и без учёта водности. В табл. 4 в качестве примера приведен фрагмент расчёта годовых объемов стока для аммонийного азота в пункте Псков (верхний створ).

Таблица 4

Объемы стока аммонийного азота, р. Великая – п. Псков (в.створ)

Год	Среднее	Средневзвешенное	Δ	|δ|, %
1969	908	1786	-878	49
1970	1673	2601	-929	36
1974	2235	2180	55	3
1975	1342	1725	-383	22
1976	567	503	65	13
1980	79	24	55	225
1981	903	1276	-373	29
1982	77	29	47	161
1984	100	53	47	89
1987	3660	542	3119	576
1988	139	103	36	35
1990	124	107	17	16
1996	59	37	22	60
1997	183	384	-201	52
1999	88	87	0	1

Как видно из представленного примера, погрешности расчетов за счет неучета водности в ряде случаев достигают значений более 100 %, и в среднем составляют около 30 %.

Для оценки влияния неучёта неэквидистентности исходной информации на расчёт годового объема стока были произведены расчёты объемов стока для всех исследуемых показателей используя концентрации, полученные с учётом и без учёта НЭ. Пример таких расчётов для нитритного азота в пункте Псков (верхний створ) представлен в табл. 5.

Как видно из представленного примера, погрешности за счёт неучёта неэквидистентности при расчёте среднегодовый концентрации могут превышать 100 % и в среднем составляют примерно 25.

Результаты расчёта годовых объемов стока по рядам значений без учёта выбросов также показывают, что в большинстве случаев объемы стока уменьшаются в 2, 3 и более раз по сравнению с объемами стока, рассчитанными по исходным рядам без проверки на выбросы (табл. 6).

Таблица 5

Объемы стока нитритного азота р. Великая – п. Псков (в.створ)

Год	Среднее	НЭ	Δ	|δ|, %
1973	0,017	0,006	0,011	183
1974	0,007	0,005	0,002	40
1975	0,007	0,003	0,004	133
1977	0,008	0,006	0,002	33
1979	0,006	0,0059	0,0001	2
1980	0,003	0,012	-0,009	75
1981	0,032	0,019	0,013	68
1984	0,031	0,02	0,011	55
1987	0,007	0,006	0,001	17
1990	0,005	0,005	0,00037	8
1995	0,005	0,005	0,0001	2
1998	0,005	0,011	-0,0056	53
2000	0,006	0,005	0,0007	12
2002	0,005	0,004	0,0009	23

Таблица 6

Расчёт годовых объемов стока по рядам измеренных концентраций с исключением и без исключения выбросов

Год	$W_{сред}$	$W_{выб}$	Δ	|δ|, %
аммонийный азот, п. Псков – н. створ				
1974	2298	1365	934	68,4
1978	6307	3981	2325	58,4
нитритный азот, п. Псков – н. створ				
1971	62	10	51	500
1973	61	52	9	17
1975	265	71	194	275
1984	281	64	218	342
железо общее, п. Псков – в. створ				
1975	706	429	278	64,7
нитратный азот, п. Псков – в. створ				
1987	6975	4696	2279	48,5

Таким образом, можно сделать вывод, что корректный расчёт среднегодовой концентрации в значительной степени влияет на точность оценки годовых объемов стока.

Выводы

1. В период с 1972 г. по 1983–1985 гг. в связи с интенсивным развитием промышленности и сельского хозяйства в предустьевой части р. Великой произошло значительное увеличение стока биогенов, поступающих в Псковско-

Чудское озеро. В период с 1983–1985 по 1990 г. в связи с принятыми мерами по строительству водоочистных сооружений сток биогенов постепенно снижался. Дальнейшее снижение происходило за счет уменьшения поступления минеральных и органических удобрений на сельскохозяйственные поля.

2. На анализ изменений во времени годовых объемов стока биогенов в существенной степени влияет учет или неучет особенностей гидрохимической информации.

3.Для более объективного анализа динамики изменения стка ЗВ необходимо разработать комбинированную методику, позволяющую учесть все особенности исходной информации.

Заключение

Неучёт особенностей первичной гидрохимической информации при определении средних годовых концентраций и годовых объемов стока ЗВ приводит к очень большим погрешностям, сопоставимыми с самими исследуемыми величинами. Следует отметить, что публикуемые в настоящее время работы, посвященные оценке химического загрязнения рек, не учитывают этого обстоятельства и, следовательно, результаты этой оценки являются весьма приближенными или сомнительными.

В результате работы были получены следующие выводы:

1. Погрешности в расчётах средних годовых концентраций и стока ЗВ при неучёте особенностей исходных рядов наблюдений настолько велики, что принятие во внимание данных особенностей обязательно и, следовательно, необходимо провести пересчёт значений средних годовых концентраций с учётом особенностей исходной информации.

2. Если значения расходов воды не учитывались при расчетах средних годовых концентраций необходимо пересчитать их с учетом расходов воды. Если данные о расходах воды отсутствуют можно использовать реку аналог или типовой для данного района гидрограф стока за каждый исследуемый год.

3. Необходимо пересчитать значения среднегодовых концентраций с учетом неэквидистентности.

4. При оценке средних годовых концентраций и объемов годового стока необходимо исключать выбросы или придавать им в расчетной формуле другой вес, отличный от весов всех других данных

5. Анализ динамики объема стока биогенов в пункте Псков показал, что для большинства веществ характерно увеличение объемов стока до начала 1990-х годов, а затем до конца 1990-х спад значений. В последние годы наблюдается тенденция увеличения значений объема стока ЗВ.

6. Неучёт особенностей гидрохимической информации может значительно сказаться на расчётах объемов стока и выводах о временной динамики изменения стока биогенов.

Литература

1. *Афифи А., Эйзен С.* Статистический анализ. Подход с использованием ЭВМ. – М.: Мир, 1982. – 488 с.
2. *Колесникова Е.В.* Развитие теории и методов оценки загрязнения речных вод: Автореф. дис. … канд. геогр. наук / Е.В. Колесникова. – СПб., 2008. – 25 с.
3. *Орлов В.Г.* Контроль качества поверхностных вод. Уч. пос. / Б.Г. Скакальский, М.А. Бесценная, А.Я. Шварцман, Л.Н. Меерович. - Л.: изд. ЛПИ, 1988. - 140 с.
4. *Сабинин Н.В., Шелутко В.А.* Анализ законов распределения концентраций биогенов и показателей содержания органического вещества в речном стоке // Сб. тезисов городской студ. конф. «Спасём дыхание планеты», СПб., 20–21 ноября 2007 г. – СПб.: изд. РГГМУ, 2007, с. 87-90.
5. *Смыжова Е.С., Шелутко В.А.* Учёт влияния неэквидистентности исходной информации на оценку биогенного загрязнения рек на примере реки Великая // Мат-лы междунар. науч.-практич. конф. «Географическое образование и наука в России: история и современное состояние» / СПб., 3-4 декабря 2008 г. – СПб.: изд. ВВМ, 2010, с. 862-871.
6. *Торопова Н.М.* Комплексная оценка загрязнения стока р. Невы и ее притоков биогенными веществами: Автореф. дис. … канд. геогр. наук. 2003. – 28 с.
7. *Шелутко В.А.* Оценка экстремальных уровней загрязнения речной сети урбанизированных территорий. Вопросы прикладной экологии // Сб. научн. трудов. – СПб.: изд. РГГМУ, 2002, с. 15-23.
8. *Шелутко В.А.* Численные методы в гидрологии: Уч. пос. - Л.: Гидрометеоиздат, 1991. – 240 с.
9. *Шелутко В.А., Колесникова Е.В.* Анализ погрешностей расчёта средних годовых концентраций загрязняющих веществ в реках за счёт неучёта водности // Вестник СПбГУ, 2008, сер. 7, вып. 3.

Е.А. Морозов, Д.В. Поздняков, В.И. Сычёв

СПУТНИКОВЫЕ НАБЛЮДЕНИЯ МНОГОЛЕТНИХ ВАРИАЦИЙ НЕКОТОРЫХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ СОСТОЯНИЯ ЭКОСИСТЕМЫ БИСКАЙСКОГО ЗАЛИВА

Eu.A. Morozov, D.V. Pozdnyakov, V.I. Sychev

OBSERVATIONS OF MULTI-YEAR SPATIAL DYNAMICS OF BIOCHEMICAL VARIABLES IN THE BAY OF BISCAY FROM SPACE

Гидроотические свойства прибрежных и в значительной части открытых частей Бискайского залива не являются водами типа 1 в силу влияния ряда факторов, таких как интенсивный речной сток, ресуспензия донных отложений под влиянием сильных ветров, развитие кальцифицирующих водорослей и некоторых других. Это обстоятельство не позволяет эффективно использовать стандартные алгоритмы обработки цвета морской воды, предложенные Национальной Администрацией США по Аэронавтике и Космосу/NASA для данных SeaWiFS и MODIS или Европейским космическим агентством/ESA для данных MERIS. Авторами разработан набор новых, специализированных под изучаемый водный объект алгоритмов для оценки количества и пространственного распределения концентрации общей взвеси, биомассы фитопланктона (через концентрацию хлорофилла-a,). Проведены идентификация и картирование областей цветения двух вредных видов фитопланктона Lepidodinium chlorophorum и Emiliania huxleyi.

Посредством последовательной процедуры стыковки данных датчиков SeaWiFS и MODIS для таких оптически сложных вод сезонные и декадная динамика биогеохимических процессов в Бискайском заливе были задокументированы и выяснена их связь с внутренними гидрологическими процессами и внешними атмосферными воздействиями.

Ключевые слова: хлорофилл, общая взвесь, вредные цветения водорослей, гидрооптический алгоритм, нейронная сеть, воды типа 2.

The hydro-optical properties of coastal and largely off-coastal waters of the Bay of Biscay are essentially non-case 1 waters due to a wealth of factors encompassing, inter alia, extensive river discharge, wind-driven bottom sediments resuspension, development of calcifying algae, etc. This precludes the employment of standard NASA (SeaWiFS, MODIS) or ESA (MERIS) ocean colour algorithms. We developed an array of new dedicated algorithms for assessing from SeaWiFS and MODIS the abundance and areal extent of suspended minerals, endemic non-harmful algal blooms, as well as identification and mapping of areas of two harmful phytoplankton groups – Lepidodinium chlorophorum and Emiliania huxleyi. Through a thoroughly substantiated procedure of bridging of SeaWiFS and MODIS data on such optically complex waters, seasonal to decadal dynamics in the biogeochemical processes and specifically algal ecology in the Bay of Biscay is documented and related to intrinsic hydrological processes, external forcing and climatic tendencies in the area.

Key words: Chlorophyll, suspended matter, harmful algae blooms, hydrooptical algorithm, neural network, case 2 waters.

1. Введение

Бискайский залив располагается в северо-восточной части Атлантического океана вдоль западного побережья Франции, от Бреста на юг к испанской границе и северному побережью Испании в районе испанской страны Басков.

Береговая линия залива сильно изрезана эстуриями и бухтами, характеризующимися весьма биопродуктивными экосистемами.

Его внешняя граница определяется по линии, соединяющей мыс Ортегаль (43° 46′ N 7°52′ W) с Пенмарч Поинт (47° 48′ N 4°22′ W) [1]. Простирающийся далеко в залив континентальный шельф оказывается ареной сильного волнения и штормов, за что этот регион получил свою известность как опаснейший для судоходства, особенно в период с поздней осени и до начала весны.

Экосистема пелагиальной части залива является местом обитания многочисленных видов китов и дельфинов, а также таких рыб, как сардина и макрель. Однако народнохозяйственное значение Бискайского залива не ограничивается исключительно промышленным рыболовством: здесь получили широкое развитие туризм, аквафермерские хозяйства, судоходство, добыча песка и гравия, а также разработки по получению волновой, приливной и ветровой электроэнергии.

Прибрежная зона имеет высокую и неуклонно возрастающую плотность населения, так как здесь располагаются разнообразные промышленные предприятия, интенсивно ведется сельское хозяйство. Таким образом, экологический статус прибрежной зоны и его изменения имеют важное значение для прибрежных стран.

Большая пространственная протяжённость и частые штормовые условия значительно затрудняют проведение морских наблюдений биогеохимических процессов, происходящих в Бискайском заливе, с помощью традиционных методов, таких как судовые измерения. Спутниковый мониторинг, как компонент интегрированной системы мониторинга, может предоставить больше возможностей, некоторые такие примеры обсуждаются нами в данном исследовании.

2. Источники и характеристика данных

Авторами использован обширный банк данных *in situ* по концентрации хлорофилла фитопланктона (*ХЛ)* и общей взвеси (*ОВ),* сформированный французским институтом IFREMER [2].

Данные были собраны синхронно и квазисинхронно (СКС) с пролётами SeaWiFS (Sea-viewing Wide Field of View Sensor) и MODIS-Aqua (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer for Aquatic studies) с 409 станций (*ХЛ*) и 213 (*ОВ*) для SeaWiFS и 261 (*ХЛ*) и 155 (*ОВ*) для MODIS в течение 1998–2004 гг. (для SeaWiFS) и 2002–2007 гг. (для MODIS). Общее число пар СКС измерений для SeaWiFS и MODIS было соответственно 1236 и 886 для *ХЛ* и 625 и 361 для *ОВ*.

Диапазон концентраций хлорофилла, определённый по данным экспедиций и прибрежных станций, составил 0,01–52,9 мкг/л и 0,01–35,24 мкг/л для пар

данных SeaWiFS и MODIS соответственно. Для *ОВ* диапазоны концентраций по этим датчикам составили соответственно 0,118,8 мг/л и 0,18–18,97 мг/л.

В дополнение к парным СК-С данным, большое число измеренных *in situ* концентраций *ХЛ* и *ОВ* было использовано для оценки точности работы разработанных биооптических алгоритмов (см. раздел ниже) индивидуально для SeaWiFS и MODIS (около 9100 и 7100 измерений для SeaWiFS и MODIS по *ХЛ* и 2500 и 1710 по *ОВ* соответственно).

Спутниковые данные уровня L2 (1998–2004 гг. для SeaWiFS и 2002–2007 гг. для MODIS) в виде спектральных нормализованных восходящих яркостей с пространственным разрешением 1 км были загружены с сайта NASA (http://oceancolor.gsfc.nasa.gov/cgi/browse.pl?sen=am). Эти данные были получены в NASA посредством обработок приходящего светового сигнала алгоритмами версий 5.2 для SeaWIFS и 1.1 для MODIS, которые включают в себя процедуры атмосферной коррекции NASA. Указанные процедуры автоматически переключаются между режимами визирования вод типа 1 и типа 2 по известной классификации Мореля [14].

Данные SeaWiFS и MODIS уровня L2 были использованы для расчёта спектральных значений коэффициента отражения для дистанционного зондирования под поверхностью $R_{rsw}(\lambda)$, как описано в [3, 4]. Для разработки биооптических алгоритмов были взяты исключительно пары СКС измерений. Остальная часть данных спутниковых измерений была использована для оценки эффективности работы разработанных алгоритмов восстановления параметров качества воды, а также для оценки совместимости данных SeaWiFS и MODIS.

Для интерпретации природы особенностей среднемесячных и сезонных вариаций исследуемых биогеохимических явлений в Бискайском заливе, в дополнение к данным по цвету океана, привлекались спутниковые данные по приводному ветру (датчик QuikSCAT) и температуре поверхности воды (датчик MODIS).

3. Методология

3.1. Алгоритмы для восстановления концентраций *ХЛ* и *ОВ* в *прибрежных водах* Бискайского залива по данным SeaWiFS и MODIS

Гоин и др. [2] показали, что стандартные алгоритмы NASA для восстановления концентраций *ХЛ* дают результаты с большими ошибками, если применяются к *прибрежным* водам Бискайского залива. Поэтому авторами были разработаны целевые биооптические алгоритмы, предназначенные для этой части акватории залива и адекватно учитывающие особенности ее оптических свойств. Алгоритмы, разработанные нами отдельно для *ХЛ* и *ОВ* и индивидуально для SeaWiFS и MODIS, основаны на использовании нейронных сетей (НС) [5], создаваемых с использованием программного пакета SNNS (ftp://ftp.informatik.uni-stuttgart.de/pub/SNNS/).

Экспериментально было установлено, что для данной задачи оптимальной является конфигурация сети с 6 нейронами на входном слое, 10 и 3 нейронами, соответственно в первом и втором скрытом слоях и одним нейроном в выходном слое, отражающим соответственно концентрацию *ХЛ* или *ОВ*. На нейроны входного слоя подаются значения подводного коэффициента отражения для дистанционного зондирования $R_{rsw}(-0, \lambda)$ на длинах волн 412, 443, 490, 510, 555 и 670 нм для сети SeaWiFS и на 412, 443, 488, 531, 555 и 667 нм для сети MODIS. По определению, $R_{rsw}(\lambda)$ есть спектральная восходящая яркость света под поверхностью воды, $L_u(-0, \lambda)$, нормированная на спектральную падающую освещенность на том же уровне, $E_d(-0, \lambda)$.

После окончания тренировки и проверки сети полученная среднеквадратичная ошибка составила 3,2 мкг/л (SeaWiFS) и 2,50 мкг/л (MODIS) для *ХЛ* and 2,9 мг/л (SeaWIFS) и 2,9 мг/л (MODIS) для *ОВ*.

Сравнение восстановленных НС-алгоритмам искомых концентраций с СКС парами, измеренными *in situ* (но незадействованными в обучении НС) показало, что коэффициент корреляции *r* составил в случае *ХЛ* 0,79 и 0,72 для SeaWiFS and MODIS соответственно и 0,71 и 0,74 в случае *ОВ* для SeaWiFS and MODIS соответственно.

Для сравнения, значения коэффициента корреляции *r* для алгоритма OC5 (который широко используется для анализа данных цвета океана в Бискайском заливе, но который восстанавливает лишь один параметр – *ХЛ* [2]) характеризуются значениями $r = 0,7$ (среднеквадратичная ошибка: СКО = 5,390 мкг/л) для SeaWiFS и $r \sim 0,6$ (СКО = ~3 мкг/л) для MODIS [6].

Таким образом, точность восстановления концентрации *ХЛ* разработанного авторами комплекса НС-алгоритмов выше точности OC5. Кроме того, НС-алгоритмы восстанавливают и другой чрезвычайно важный в экологическом отношении параметр – *ОВ*, определяющий вместе с *ХЛ* световой режим и условия фотосинтетической активности в водном столбе.

3.2. Алгоритм для идентификации и картирования *Lepidodinium chlorophorum*

Нам не известны разработанные к настоящему моменту алгоритмы для определения/идентификации *L. chlorophorum*. Как и в подразделе 3.1, для данного исследования было использовано программное обеспечение SNNS. Архитектура сети в этом случае состояла из 6 нейронов во входном слое (по числу спектральных каналов датчика MODIS-Aqua; в этом исследовании были использованы только данные датчика MODIS), 6 нейронов в скрытом слое и один нейрон в выходном слое, отражавшем наличие или отсутствие этого вида планктона.

В качестве входных данных выступали спектральные значения коэффициентов отражения для дистанционного зондирования под поверхностью воды $R_{rsw}(\lambda)$ на длинах волн, соответствующих 6 каналам видимого диапазона

MODIS. Входные значения $R_{rsw}(\lambda)$ на 6 каналах инвертируются сетью, результатом чего в выходном нейроне является число, варьирующее от 0 до 1. Значение 0 означает отсутствие цветения *L. chlorophorum*, а значение 1 означает соответственно, что пиксель достоверно принадлежит к области цветения *L. chlorophorum*. Результаты в промежутке между 1 и 0 считаются переходными от отсутствия цветения к цветению. Такие значения округлялись до 0 или до 1.

Наряду с НС-алгоритмом, авторами был разработан для этой же цели и алгоритм, основанный на методе нечётких С-средних: (нС-с) (fuzzy C-means), в котором нечёткие кластеры описываются матрицей нечёткого разбиения. Нечёткое разбиение позволяет легко решить проблему отнесения к одному из классов объекта находящегося на границе двух классов. Это осуществляется присвоением объекту степени принадлежности, равной 0,5.

Проведение процедуры нечёткой кластеризации основано на нелинейной оптимизации: в нашем случае это метод неопределённых множителей Лагранжа. Реализация алгоритма осуществляется по последовательной итеративной схеме [7].

Благодаря содержанию в пигментной системе *L. chlorophorum ХЛ-b* и перидинина, поглощающего в голубой области спектра [8], сигнал в третьем канале MODIS (488 нм) оказывается редуцированным, в результате чего в восстановленном спектре $R_{rsw}(\lambda)$ появляется минимум (или отрицательный прогиб). Это свойство было использовано нами для предварительной фильтрации спектров $R_{rsw}(\lambda)$ перед их обработкой обоими алгоритмами (НС и нС-с). Следует подчеркнуть, что примененный критерий не является самодостаточным: эффективность идентификации обоими алгоритмами *L. chlorophorum* обеспечивается учётом спектральных особенностей, извлечённых из *всех* каналов MODIS в видимом диапазоне спектра. Тем не менее, использование этого критерия оказывается весьма полезным для повышения точности работы алгоритмов НС и нС-с.

Для проверки эффективности идентификации *L. chlorophorum* алгоритмами НС и нС-с было произведено сравнением с измерениями *in situ* количества клеток *L. chlorophorum* на двух станциях *viz*. Ouest-Loscolo и Le-Croisic (расположенных на 47° 27′ N -2°32’W и 47° 18′ N -2° 31′ W). Выяснилось (см. табл.), что во всех случаях с высокой концентрацией *L. chlorophorum* наличие этой водоросли определялось обоими алгоритмами безошибочно; однако когда концентрация *L. chlorophorum* невысока или она не является доминирующей в фитокомплексе, точность идентификации снижается за счёт подавления сигнала *L. chlorophorum* в результирующем спектре $R_{rsw}(\lambda)$ другими группами/таксонами фитокомплекса. В результате для данной выборки в 67 % случаев цветения *L. chlorophorum* определяются верно каждым из двух разработанных алгоритмов и 75 %, когда оба алгоритма применяются совместно (ансамблевый режим). Таким образом, наиболее перспективно применение обоих алгоритмов в ансамблевом режиме.

Эффективность идентификации *L.chlorophorum* алгоритмами НС и нС-с

Станция	Дата	Концентрация *L. chlorophorum* (клеток/мл), определённая *in situ*	Алгоритм НС	Алгоритм сН-с
Ouest-Loscolo	09/09/2002	7 200	0	0
Ouest-Loscolo	24/09/2002	380 000	1	1
Ouest-Loscolo	07/06/2004	34 000	1	1`
Ouest-Loscolo	19/09/2005	400 000	1	1
Ouest-Loscolo	03/10/2005	200 000	1	1
Ouest-Loscolo	07/11/2006	66 000	0	0
Ouest-Loscolo	29/05/2007	8600	0	0
Ouest-Loscolo	12/06/2007	160 000	1	1
Ouest-Loscolo	24/07/2007	900 000	1	1
Le-Croisic	09/07/2007	7 450 000	1	0
Le-Croisic	06/08/2007	28 800	1	1
Le-Croisic	15/07/2008	6200	0	1

3.3. Алгоритм для идентификации и количественной оценки биомассы *Emiliniania huxleyi* (по концентрации ХЛ) в присутствии диатомовых водорослей

Ранее Батч и др. [9] разработали алгоритм для определения концентрации *ХЛ* в клетках *E. huxleyi* и кокколит (отделившихся от клеток этой микроводоросли пластин) в океанских водах при отсутствии в них других сопутствующих видов фитопланктона. В Бискайском заливе цветения *E. huxleyi* сопровождаются цветением диатомовых водорослей. Это определило необходимость разработать специализированный алгоритм для этой области залива. Наш алгоритм основан на многокомпонентной гидрооптической модели (см. ниже), включённой в процедуру многомерной оптимизации Левенберга-Марквардта (Л-М) [10].

3.3.1. Описание процедуры Л-М

Процедура основывается на сравнении измеренного со спутника коэффициента отражения для дистанционного зондирования под поверхностью воды $R_{rsw}(\lambda)$, который является функцией вектора концентраций $\boldsymbol{C}$, включающего в себя все сосуществующие цветообразующие компоненты в воде (ЦОК) и соответствующие им спектральные удельные коэффициенты поглощения $a^*(\lambda)$ и обратного рассеяния $b^*_b(\lambda)$ с его рассчитанным/модельным эквивалентом $R^*_{rsw}(\lambda)$.

Многомерное (среднеквадратичное) решение задачи достигается за счёт минимизации квадратов расхождений $g_i(\boldsymbol{C})$ между $R^*_{rsw}(\lambda)$ и $R_{rsw}(\lambda)$:

$$f(\boldsymbol{C}) = \sum ig_i^2(C),$$

где $g(C) = \sum_j \frac{R*_j(\lambda\lambda - R_{rsw_j}(\lambda\lambda C)}{R_{rsw_j}(\lambda\lambda C)}$.

Абсолютный минимум $f(\boldsymbol{C})$ может быть найден алгоритмом конечных разностей Левенберга-Марквардта [11, 12], обеспечивающим быстрое схождение процедуры итерации. Мы использовали параметризацию $R*_{rsw}(\lambda)$ для вод типа 2, предложенную в [13], которая применима для широкого диапазона солнечных зенитных углов и углов обзора, близких к надиру.

3.3.2. Гидрооптическая модель

Известно, что кальцифицирующая водоросль *E. huxleyi* развивается *в основном* в открытых частях Бискайского залива [14]. Клетки *E. huxleyi* покрыты пластинками карбоната кальция (называемыми кокколитами). Число пластинок у отдельной клетки может значительно варьировать. Таким образом, области цветения *E. huxleyi* даже в открытых водах следует рассматривать как ареалы вод типа 2 [15].

Мы затабулировали значения удельного спектрального коэффициента обратного рассеяния $[b_b*(\lambda)]$ клеток *E. huxleyi* и кокколитов, использовав графические данные в [16], и применили значения удельного спектрального коэффициента поглощения $[a*(\lambda)]$ кокколитофора, полученного в [17]. Кокколиты считаются не поглощающими в видимом диапазоне спектра.

В соответствии с [15], некальцифицирующим фитопланктоном, предшествующим и, отчасти, сопутствующим цветению *E. huxleyi в* Бискайском заливе являются в основном диатомовые. Данные об их спектральных значениях $a*(\lambda)$ и $b_b*(\lambda)$ приведены, например, в [18].

Таким образом, первичные гидрооптические характеристики вод, подверженных цветению *E. huxleyi* (открытые воды Бискайского залива, не содержащие растворённое органическое вещество и минеральную взвесь континентального происхождения [19]), могут быть представлены следующим образом (для простоты, зависимость от длины волны опущена):

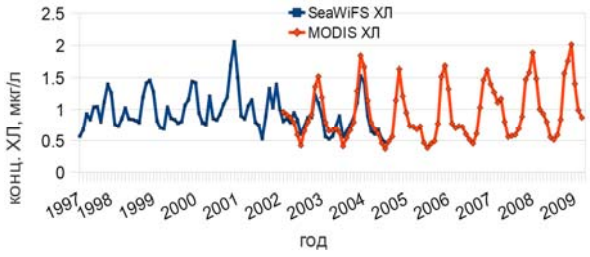
$$a = a_w + a*_d C_d + a*_{coc} C_{coc} + a*_{cc} C_{cc};$$

$$b_b = b_{bw} + b*_{bd} C_d + b_b*_{coc} C_{coc} + b_b*_{cc} C_{cc},$$

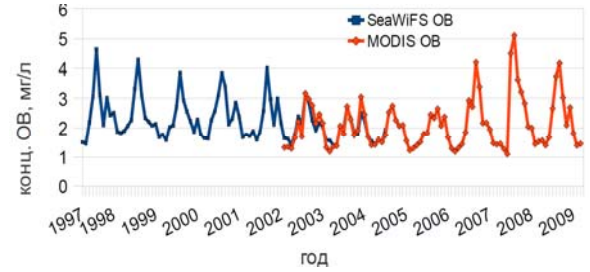
где индексы w, d, coc, cc обозначают соответственно воду, диатомовые водоросли, кокколитофоры (*E. huxleyi)* и кокколиты; $a*_{cc}$ может быть принято равным 0, в соответствии со сказанным выше.

3.4. Процедура стыковки спутниковых данных

Исследование [20] совместимости данных SeaWiFS и MODIS, обработанных НС-алгоритмами для Бискайского залива, показало, что после пространственного и временного осреднения данные SeaWiFS и MODIS могут быть надёжно объединены в единый временной ряд. Средняя абсолютная ошибка и коэффициент корреляции для периода перекрытия данных SeaWiFS и MODIS (июль 2002 – декабрь 2004 гг.) оказались соответственно 18,24 % и 0,91 для *ХЛ* и 8,63 % и 0,93 для *ОВ* (рис. 1).



а



б

Рис. 1. Временные ряды (1997–2009 гг.) вариаций концентраций ХЛ, мкг/л (*а*) и ОВ, мг/л (*б*), усредненных по прибрежной зоне (внешней границей которой является 200 м изобата)

4. Результаты и обсуждение: сезонная и межгодовая динамика биогеохимических процессов в Бискайском заливе

В полном соответствии с историческими данными, полученными *in situ* [21], сезонная изменчивость *ХЛ* в прибрежной зоне имеет два максимума: а) поздняя весна–раннее лето и осенний (конец сентября–октябрь). Более интенсивным является первое цветение. Время наступления пика цветения немного отличается от года к году, причины этих смещений обсуждаются ниже.

Пики изменчивости/максимумы концентрации *ОВ* случаются в январе и сопровождаются вторичными максимумами, наступающими в апреле–мае и осенью. Эта последовательность обусловлена особенностями сезонной динами речного стока в Бискайский залив [21, 22]. В зимнее время области высоких концентраций *ОВ* появляются в результате ресуспензии донных осадков, вызы-

ваемых сильными прибрежными ветрами, что регулярно можно наблюдать по данным цвета океана. Это находит свое подтверждение в анализировавшихся авторами спутниковых данных датчика QuikSCAT (не проиллюстрированных здесь): продолжительность периода высокой концентрации *ОВ* в прибрежной зоне перекрывает не только январь (месяц максимального стока наиболее полноводных рек на французском побережье), но и февраль, а иногда и март в тех случаях, когда в прибрежной полосе скорости приводного ветра составляли 20 м/с и более.

Применение НС-алгоритма позволило не только точно задокументировать все фазы этого явления (его начало и развитие) [20], но и оценить количество ресуспензированных осадков, поступающих в воду, исходя из очевидно реалистического предположения, что водная толща в эти моменты полностью перемешана.

Межгодовые изменения, наблюдаемые из космоса, демонстрируют значительную межгодовую изменчивость в гидрологических и биогеохимических режимах Бискайского залива. Рис. 1 иллюстрирует временные ряды (1997–2009) изменений *ХЛ* (рис. 1, *а*) и *ОВ* (рис. 1, *б*) в прибрежных водах Бискайского залива. Эти данные показывают, что может быть выделено три периода с различным характером изменчивости *ХЛ*: 1998–2003; 2003–2004 и 2005–2008. Средний из этих трёх периодов характеризуется значительным уменьшением биомассы водорослей (среднее значение *ХЛ* составляет 0,86 μг/л). Таким образом, различают два режима в функционировании экосистемы: первый (1998–2002) характеризуется медленным уменьшением первичной продуктивности (-0,36 мкг*ХЛ*/л за десятилетие), тогда как во втором режиме на протяжении 2005–2008 тренд изменяется на положительный со скоростью изменения ~ +0,58 мкг*ХЛ*/л за десятилетие.

Основная изменчивость во временных рядах *ОВ* (рис. 1, *б*) обнаруживает весьма схожие с *ХЛ* тенденции (рис. 1, *а*): за период 1997–2009 существовал сравнительно короткий промежуток времени (2004–2006), характеризуемый значительным спадом поступления *ОВ* в прибрежные воды. Затем эта тенденция сменяется быстрым подъёмом поступления *ОВ*, который, как и в случае *ХЛ* (рис. 1, *а*) постепенно приводит к увеличению амплитуды сезонных колебаний.

Основываясь на этих двух временных рядах можно предположить, что период «затишья» был результатом временного уменьшения речного стока и, возможно, снижением ветровой активности в прибрежной зоне, который и вызвал уменьшение поступления *ОВ*, а также питательных веществ в воды этой части залива, что и сказалось на снижении уровня развития фитопланктона.

Исследование сезонной и межгодовой изменчивости в наступлении и развитии цветения *ХЛ* и увеличения концентраций *ОВ*, а также изменчивости пространственной протяжённости их ареалов обнаружили существование нескольких случаев/конкретных лет, когда характер этих явлений отличается от режима, обычного для прибрежных вод Бискайского залива (рис. 2).

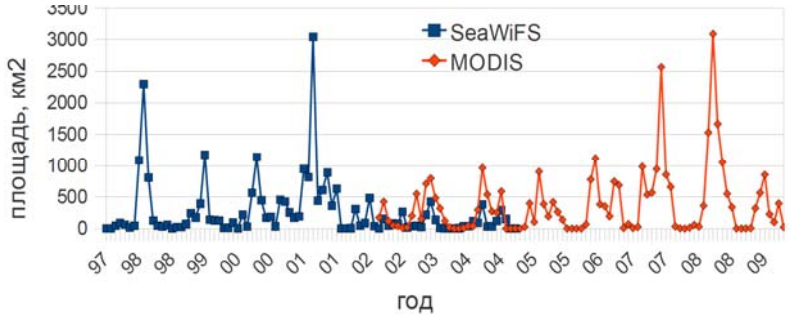


Рис. 2. Временные ряды вариаций площади, занимаемой цветением фитопланктона с концентрацией ХЛ более 7 мкг/л в северной части Бискайского залива

Некоторые из этих отклонений/изменений могут быть объяснены атмосферно-погодными факторами, но в 1999, 2007 и 2008 гг. движущей силой было, очевидно, вызванное апвеллингом поступление питательных веществ из донных осадков, что находит свое отражение во временной динамике поля концентрации *ХЛ* (увеличении периода цветения фитопланктона). Рис. 3 иллюстрирует эту ситуацию на начало июня 2008 г. Анализ спутниковых данных датчиков QuikSCAT и MODIS по силе приповерхностного ветра и температуре поверхности воды (не проиллюстрированных здесь) полностью подтвердил, что в этот период, действительно, в северной части залива сформировался апвеллинг, который был вызван продолжительными (длительностью несколько дней) северо-восточными ветрами. Возникновение апвеллингов в северной части Бискайского залива описано во многих судовых исследованиях (см., например, [22]).

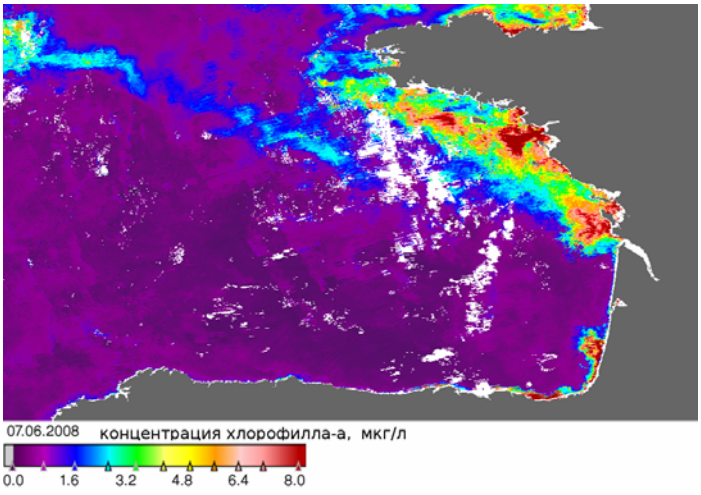


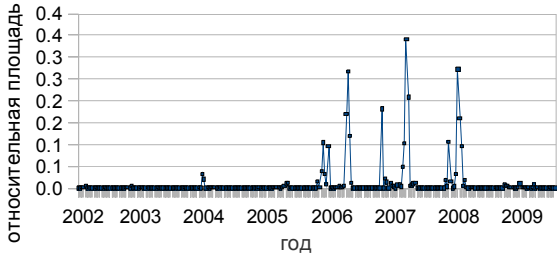
Рис. 3. Цветение фитопланктона в первую неделю июня 2008 г., вызванное апвеллингом

Вышеупомянутые данные по случаям ресуспенции донных осадков зимой, а также и усиление и большая протяжённость цветений фитопланктона, вы-

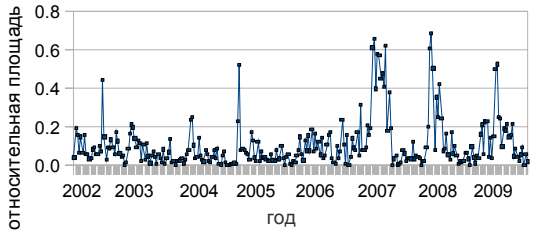
званные апвеллингом в середине лета показывают, что биогеохимические поля в Бискайском заливе подвержены значительному влиянию ветровой активности в этом регионе.

Как отмечалось выше, в Бискайском заливе развиваются виды фитопланктона, относящиеся к разряду вредных, в частности, зеленой динофлагеллятной водоросли *Lepidodinium chlorophorum* и кальцифицирующей водоросли *Emiliania huxleyi.*

Основанное на спутниковых данных, исследование многолетней изменчивости динамики цветения *L. chlorophorum* во французской части побережья Атлантического океана, показало, что существуют две области, в которых такие цветения происходят довольно спорадично, но каждое событие имеет большую пространственную протяжённость (см., например, рис. 4, *а*), тогда как в других районах, в основном смежных с дельтами впадающих в залив рек (см. рис. 4, *б*), этот вид фитопланктона развивается ежегодно, но часто в достаточно ограниченных, не больших по площади областях. Как иллюстрирует рис. 4, за последнее десятилетие эти события приобретают тенденцию к учащению и распространению по более протяженной области, что могло бы быть связано с климатическими изменениями в районе.



а

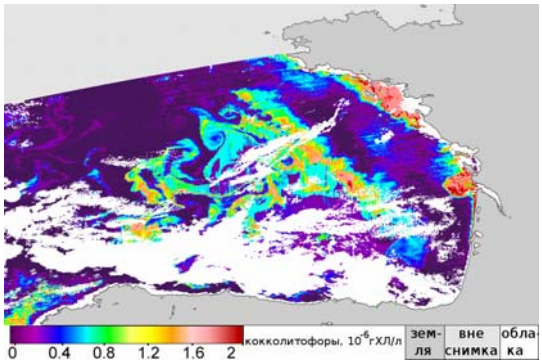


б

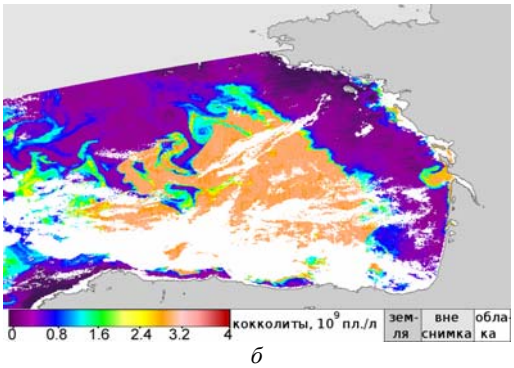
Рис. 4. Интенсивность цветений L. chlrophorum (относительная область занятая водорослями) в море Д'Ируаз (*а*) и в районе р. Шаранта (*б*)

Рис. 5, *а* иллюстрирует случай интенсивного цветения кокколитофоры *E. huxleyi* в центральной, пелагиальной части Бискайского залива, выявленного по снимку MODIS, обработанному Л-М-алгоритмом. Последствием цветения

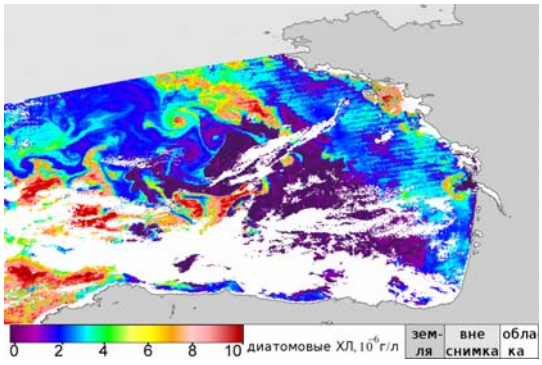
E. huxleyi является массивное образование кокколитов, которое продемонстрировано на рис. 5, *в*. Этому цветению предшествовало интенсивное развитие диатомовых, следы которого различимы на восточной периферии цветения *E. huxleyi* (рис. 5, *б*).



а



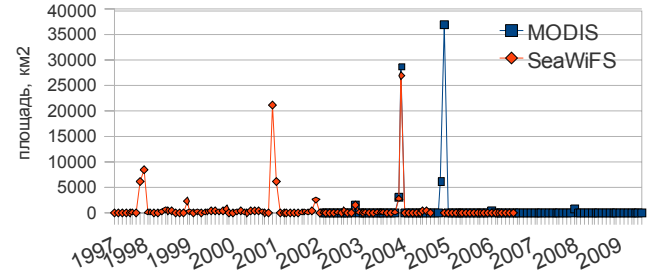
б



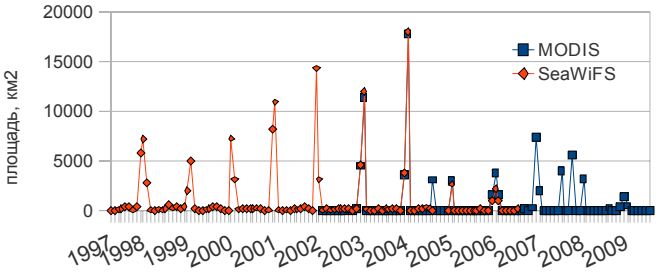
в

Рис. 5. Результаты восстановления концентраций (*а*) – кокколитофоров (мкгХЛ/л), (*б*) – кокколитов (10^9 пластин/л) и диатомовых водорослей (*в*) (мкгХЛ/л), по данным MODIS за 5 мая 2005 г., с использованием алгоритма, основанного на процедуре многомерной оптимизации Левенберга-Марквардта и гидрооптической модели для открытой части Бискайского залива, описанных в тексте выше

Для исследования многолетней динамики образования цветений *E. huxleyi* использовались RGB-изображения (т.е. изображения в ложных цветах, получаемого комбинацией яркостных сигналов в красном, зеленом и голубом каналах), полученные по данным CZCS, SeaWiFS и MODIS (с 1997–2009 гг. для SeaWiFS и MODIS, и 1978–1986 гг. для CZCS). При анализе оценивались не только число, но также и пространственную протяжённость цветений. В эпоху CZCS цветения *E. huxleyi* были относительно небольшой протяжённости и располагались в районе моря Д'Ируаз (рис. 6, *а*). Позднее, цветения кокколитофор продвинулось к югу, распространяясь на значительно большую территорию (рис. 6, *б*). Как иллюстрирует рис. 6, эти более чем десятилетние спутниковые наблюдения свидетельствуют о том, что явление цветения *E. huxleyi* становилось всё более интенсивным до 2005 г., охватывая (например, в 2005 г., рис. 5, *а*) большую долю пелагиальной части Бискайского залива.



а



б

Рис. 6. Площадь, занимаемая E. huxleyi в Бискайском Заливе:
а – центральная часть залива, *б* – море Д'Ируаз

Как свидетельствуют результаты наших исследований, в открытых частях Бискайского залива явления цветений вредных водорослей (в отличие от прибрежной зоны) происходят нерегулярно, с явной тенденцией к росту частотности этого явления во второй половине первого десятилетия XXI в. Можно предположить (как это уже отмечалось выше), что выявленные тенденции в харак-

тере полученных временных рядов по цветению *E. Huxleyi* и *L. Chlorophorum* обусловлены не просто вариациями погодных условий в конкретные годы, а некими климатическими сдвигами. Однако, безусловно, эта гипотеза нуждается в дополнительных исследованиях.

Заключение

Разработанные алгоритмы для восстановления некоторых параметров качества воды и идентификации цветений вредных водорослей вместе с полученным достоверным подтверждением совместимости данных SeaWiFS и MODIS для Бискайского залива позволили ***впервые*** установить и наблюдать во времени многочисленные сезонные, межсезонные и многолетние изменения в биогеохимических полях в прибрежных водах и пелагиальной зоне этого водного объекта. Синергетическое использование спутниковых данных о силе и направлении ветра, ТПО, данных о цвете океана и доступных *in situ* данных предоставило возможность интерпретировать наблюдаемую динамику биогеохимических полей в терминах региональных океанологических процессов и, предположительно, климатических изменений.

Авторы выражают благодарность коллегам из IFREMER за предоставленную уникальную базу синхронных и квазисинхронных с пролетом спутников SeaWiFS и MODIS данных, полученных измерениями *in situ* параметров качества воды в прибрежных водах Бискайского залива.

Литература

1. Limits of Oceans and Seas, 3rd edition + corrections". International Hydrographic Organization. 1971. c. 42 ; http://www.iho-ohi.net/iho_pubs/standard/S-23/S23_1953.pdf.
2. *Gohin F., Druon J. N. & Lampert L.,* (2002). A five channel chlorophyll concentration algorithm applied to SeaWiFS data processed by SeaDAS in coastal waters. *International Journal of Remote Sensing*, 23(8), p. 1639-1661.
3. *Jerome J. H, Bukata R.P. & Miller J.R.* (1996), Remote sensing reflectance and its relationship to optical properties of natural water. *International Journal of Remote Sensing*, 17(1), cc. 43-52.
4. *Pozdnyakov D.V., Pettersson L.H., Johannessen O.M., Lyaskovsky A.V., Filatov. N.N. & Bobylev L.P.* (2003). SeaWiFS maps water quality parameters of the White Sea. *International Journal of Remote Sensing*, 24, p. 3-6.
5. *Haykin S.* (1998). *Neural Networks. A Comprehensive Foundation*, cc. 31-36 (New Jersey: Prentice Hall).
6. *Gohin F.* (2009). personal communication
7. *Shtobva S.D.* (2009). “Introduction into the theory of fuzzy ensambles and fuzzy logic”. http://matlab.exponenta.ru/fuzzylogic/book1/12.php
8. *Hoepffner N., Sathyendranath.* (1993) S. Determination of the major groups of phytoplankton pigments from the absorption spectra of total particulate matter// Journal of Geophysical Research. V. 98. № C12, p. 22789-22803.
9. *Balch W.M., Gordon H.R., Bowler B.C. et al.* (2005). Calcium carbonate measurements in the surface global ocean based on Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer data. *Journal of Geophysical Research* Vol. 110 (C07001).

10. *Korosov A.A., Morozov Eu.A., Pozdnyakov D.V., Pettersson L. H. & Grassl H.* (2009) Spaceborne Identification and Mapping of the Areas of Coccolithophore Blooms in the Bay of Biscay . *Remote sensing of the Earth*, 3, p. 67-78.
11. *Levenberg K.* (1944). A method for the solution of certain non linear problems in least squares. *Quantitative and applied Mathematic*, 2, p. 164-168.
12. Marquardt, D. W. (1963). An algorithm for least squares estimation of non-linear parameters. *Journal of the International Society of Applied Mathematics*, 11(2), p. 36-48.
13. *Jerome J.H, Bukata R.P. & Miller J.R.,* 1996, Remote sensing reflectance and its relationship to optical properties of natural water. *International Journal of Remote Sensing*, 17(1), p. 43-52.
14. *Lavender S.J., Raitsos, D.E. & Pradhan Y.,* 2008. Variations in the phytoplankton of the North-Eastern Atlantic Ocean: from the Irish Sea to the Bay of Biscay. In V. Barale and M. Gade (Eds.), *Remote Sensing of the European Seas,* pp. 67-78 (Springer Science+Business Media B.V.).
15. *Morel A. & Bricaud A.,* (1981). Theoretical results concerning light absorption in a discrete medium, and application to specific absorption of phytoplancton. *Deep Sea Res. P.I. A. Oceanogr. Res. Papers.* 28, p. 709-722.
16. *Balch W.M.K., Drapeau D.T., Cucci T.L. et al.* (1999). Optical backscattering by particulate inorganic and organic carbon fractions, *Journal of Geophysical Research* 104. cc. 1541 – 1558.
17. *Bricaud A., Morel A. & Prieur L.* (1983). Optical efficiency factors of some phytoplankterrs, *Limnology and Oceanography*, 28, p. 816-832.
18. *Sathyendranath S.* (2000). General Introduction. In: *Remote Sensing of Ocean Colour in Coastal, and other Optically-Complex, Waters*. (Ed. S. Sathyendranath). IOCCG Report No.3, p. 5-21.
19. *Gohin F, Saulquin B., Oger-Jeanneret H., Lozac'h L., Lampert L., Lefebvre A., Philippe Riou, P. & Bruchon F.* (2008). Towards a better assessment of the ecological status of coastal waters using satellite-derived chlorophyll-a concentrations. *Remote Sensing of Environment*, 112, p. 3329-3340.
20. *Morozov E., Korosov A., Pozdnyakov D., Pettersson L. & Sychev V.* (2010). A new area-specific bio-optical algorithm for the Bay of Biscay and assessment of its potential for SeaWiFS and MODIS/Aqua data merging, *International Journal Of Remote Sensing*. In press accepted.
21. *Lampert L., Queguiner B., Labasque T., Pichon A. & Lebreton N.* (2002). Spatial variability of phytoplankton composition and biomass on the eastern continental shelf of the Bay of Biscay (north-east Atlantic Ocean). Evidence for a bloom of *Emiliania huxleyi* (Prymnesiophyceae) in spring 1998. *Continental Shelf Research*, 22, p. 1225-1247.
22. *Puillat I., Lazure P., Jegou A.M., Lampert L. & Miller P.I.* (2004). Hydrographical variability on the French continental shelf in the Bay of Biscay, during the 1990s, *Continental Shelf Research*, 24, p. 1143–1163.

ОКЕАНОЛОГИЯ

Ю.В. Малинина

К ОЦЕНКЕ ВОЗМОЖНОГО УЩЕРБА ОТ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО ПОВЫШЕНИЯ УРОВНЯ ОКЕАНА В XXI СТОЛЕТИИ

Yu. Malinina

ON ESTIMATION OF POSSIBLE LOSSES CAUSED BY POTENTIAL SEA LEVEL RISE DURING THE 21ST CENTURY

Предложена простая линейная статистическая зависимость изменений уровня Мирового океана от приповерхностной температуры воздуха, позволяющая в линейном приближении прогнозировать его возможные изменения на конец XXI в. Осуществлена систематизация прямых и косвенных неблагоприятных последствий повышения морского уровня. Обсуждается методология и приводятся количественные оценки экономических ущербов, полученные различными коллективами авторов. Рассчитаны эмпирические зависимости возможных ущербов от повышения уровня моря в XXI в.

Ключевые слова: глобальные изменения климата, повышение уровня Мирового океана, прямой ущерб, косвенный ущерб.

A simple linear relationship between sea level changes and sub-surface air temperature which allows forecasting its potential changes at the end of the 21st century in linear approximation. Established is the classification of direct and indirect adverse consequences caused by sea level rise (SLR). Discussed is the methodology and given are the numerical estimates of economic costs obtained by different groups of authors. Empirical dependencies of possible losses from SLR during the 21st century are calculated.

Key words: global climate change, sea level rise, direct damage (costs), indirect damage (costs).

Как известно, наиболее ярким следствием современных изменений климата является постоянное повышение уровня Мирового океана (УМО). Если в течение XX в. его рост составлял 1,8 мм/год [1], то на рубеже XX–XXI вв. его рост по данным альтиметрических наблюдений повысился до 3,0–3,2 мм/год [2]. Еще более значительный рост УМО прогнозируется в Третьем и Четвертом оценочных докладах МГЭИК (Межправительственной группы экспертов по изменениям климата) [3, 4], основанный на расчетах по моделям общей циркуляции атмосферы и океана (МОЦАО), использующих различные сценарии изменений климата. При этом, хотя в основе любой оценки изменения климата лежат сценарии эмиссии парниковых газов в атмосферу, однако в конечном счете

именно эмиссия CO_2 в атмосферу определяет сценарии изменения климата, рассчитываемые по МОЦАО. Сценарии эмиссии парниковых газов и задают временной ход воздействия на состояние атмосферы при моделировании отклика системы океан-атмосфера в масштабе текущего столетия – моделировании климатических изменений в зависимости от различных моделей развития человечества, которым соответствуют четыре группы сценариев (*A1, A2, B1, B2*) [5].

Самый высокий уровень (>1800 GtC) суммарной эмиссии CO_2 свойствен семейству сценариев *A1* (частично для *A2*); средний/высокий уровень (1450–1800 GtC) – для *A1* и *A2* (частично для *B2*); средний/низкий уровень (1100–1450 GtC) – для *A1*, (частично для *A2, B1, B2*); низкий уровень (<1100 GtC) – для *B1* (частично для *A1*). Наиболее широкий диапазон уровней охватывает семейство сценариев *A1*, в которых задается самый высокий уровень эмиссии CO_2. Самые мягкие прогнозы дает семейство *B1*, средние – семейство *B2*. Все сценарии прогнозируют существенное увеличение суммарной эмиссии CO_2 к 2100 г. Следует иметь в виду, что оценки возможного изменения климата в XXI веке основаны не на расчетах по отдельным моделям, а на осреднениях результатов расчетов по нескольким моделям (ансамблю). Например, в проекте CMIP3 осреднение характеристик проводилось по ансамблю из 16 моделей, вследствие чего происходит нивелирование (сглаживание) оценок, полученных по конкретным моделям, хотя при этом сохраняются систематические ошибки одного знака, присущие моделям как классу [6]. Одновременно с этим крайние оценки характеристик, рассчитанных по численным моделям, позволяют выявить амплитуду их изменчивости (вероятный прогностический интервал).

В табл. 1 даются *вероятные* диапазоны для глобального среднего потепления приземного слоя воздуха для шести сигнальных сценариев выбросов СДСВ (включая обратные связи климат-углеродный цикл) [4]. Одновременно с этим в табл. 1 приводятся прогнозные оценки среднего повышения УМО на 2090–2099 гг. для тех же шести сценариев СДСВ.

Таблица 1

Возможные оценки изменений глобальной приповерхностной температуры воздуха и уровня Мирового океана на конец XXI в. (2090–2099 гг.) по сравнению с концом XX в. (1980–1999 гг.)

Сценарий выбросов СДСВ	Ансамбль из 16 моделей общей циркуляции атмосферы и океана [4]		Статистическая модель
	Вероятный диапазон роста температуры на конец 2090–2099 гг., °С	Вероятный диапазон роста УМО на конец 2090–2099 гг., м	Вероятный диапазон роста УМО на конец 2090–2099 гг., м
Сценарий *B1*	1,1 – 2,9	0,18 – 0,38	0,12 – 0,31
Сценарий *A1T*	1,4 – 3,8	0,30 – 0,45	0,15 – 0,41
Сценарий *B2*	1,4 – 3,8	0,20 – 0,43	0,15 – 0,41
Сценарий *A1B*	1,7 – 4,4	0,21 – 0,48	0,18 – 0,47
Сценарий *A2*	2,0 – 5,4	0,23 – 0,51	0,21 – 0,58
Сценарий *A1FI*	2,4 – 6,4	0,26 – 0,59	0,26 – 0,68

Как видно из табл. 1, в результате повышения глобальной температуры воздуха рост УМО к концу XXI в. может составить 20–60 см, что соответствует тренду в 2–6 мм/год. Отметим, что близкие прогностические оценки УМО могут быть получены с помощью очень простой статистической модели без использования комплекса МОЦАО. Как было показано в работе [7], изменения приповерхностной температуры воздуха (ПТВ) 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 [8, 9], а через изменения температуры поверхности океана вызывают стерические колебания уровня. Таким образом, именно ПТВ можно рассматривать как главный определяющий фактор колебаний УМО.

На рис. 1 представлено сопоставление глобальных оценок аномалий ПТВ за период 1960–2008 гг., заимствованных из глобального архива HadCRUT3 [10] и УМО, рассчитанного по футшточным (береговым) наблюдениям [1]. Нетрудно видеть, что с повышением температуры воздуха УМО линейно повышается. Это позволило рассчитать методом наименьших квадратов линейное уравнение регрессии

$$H_{УМО} = 107{,}1\Delta T_{GL} + 221{,}0.$$

где $H_{УМО}$ – средний глобальный уровень Мирового океана; ΔT_{GL} – аномалии глобальной приповерхностной температуры воздуха.

Коэффициент детерминации данной модели равен R^2 =0,73, т.е. она описывает 73 % дисперсии исходного ряда, средняя квадратическая ошибка модели $\sigma_{y(x)}$ =14,7 мм.

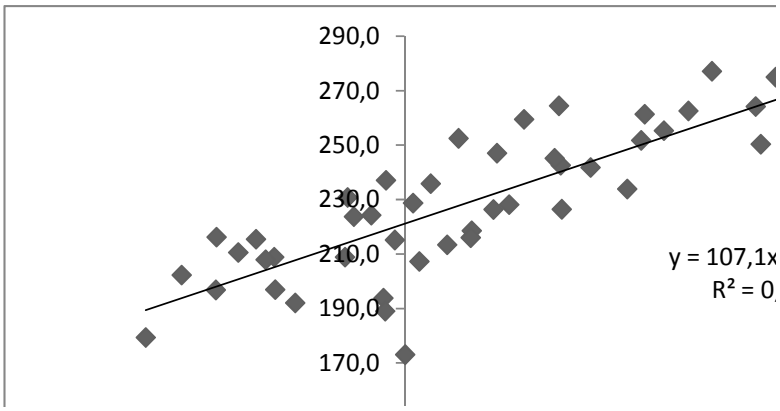


Рис. 1. Зависимость межгодовых колебаний уровня Мирового океана от аномалий приповерхностной температуры воздуха над земным шаром по данным [10] за период 1960–2008 гг.

Данное уравнение позволяет весьма просто в линейном приближении прогнозировать возможные изменения УМО в зависимости от изменений глобаль-

ной ПТВ. Такие расчеты, соответствующие 6 сценариям выбросов парниковых газов и оценкам повышения ПТВ, были выполнены и также приведены в табл. 1. Практически для всех сценариев выбросов оценки возможного роста УМО по статистической модели весьма близки к результатам численного моделирования климата на основе МОЦАО. Для того чтобы убедиться в достоверности полученных оценок, были построены аналогичные статистические модели УМО от ПТВ с использованием временных рядов глобального уровня океана [11] и [12], а затем выполнены оценки роста УМО в зависимости от ПТВ. На рис. 2 дается сопоставление результатов, полученных по 3 статистическим моделям для 5 сценариев выбросов. Нетрудно видеть почти полную тождественность в оценках. Только максимальные оценки УМО по данным [12] чуть-чуть ниже.

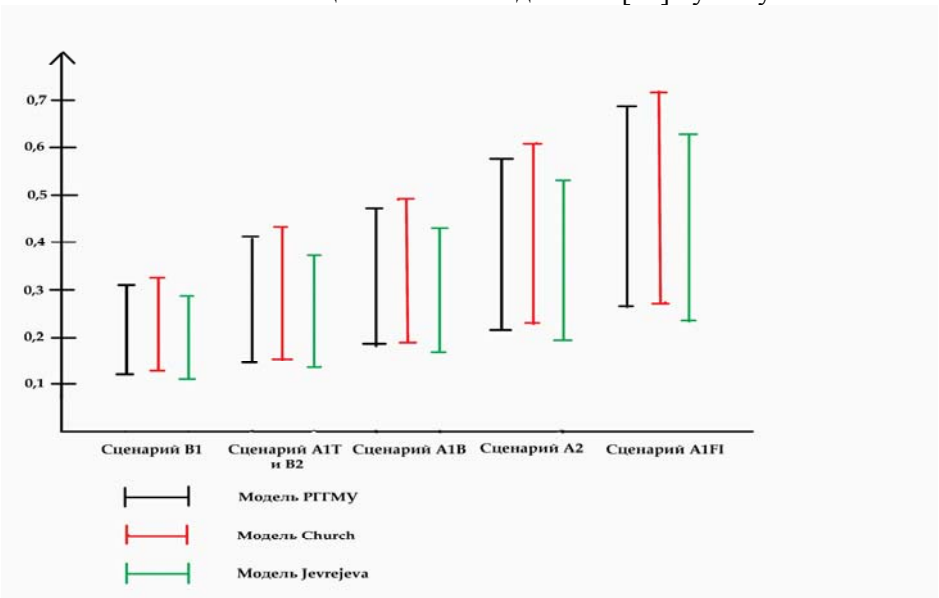


Рис. 2. Сопоставление результатов расчета УМО, полученных по 3 статистическим моделям для 5 сценариев выбросов

Итак, прогностические оценки УМО на конец XXI в. можно получить с помощью простой линейной статистической зависимости уровня океана от приповерхностной температуры воздуха практически не отличающихся от результатов, основанных на использовании сложных и дорогих МОЦАО.

Отметим также, что мнению ряда исследователей к концу столетия можно ожидать ускоренное таяние и последующее разрушение Восточно-Антарктического ледяного щита. В этом случае рост УМО может существенно превысить 1 м.

Естественно, если рассмотренные выше сценарии изменений климата станут реальностью, то это грозит громадным ущербом для инфраструктуры прибрежных территорий, где проживает около миллиарда жителей Земли. Вполне

возможно, что в зоне возможных наводнений могут оказаться дополнительно от 20 до 300 млн человек ежегодно, а капитальные потери составят 7–70 млн долл. [13] при повышении температуры на 3–4 ^{o}C, вызывающем 20–80 см повышение уровня моря (соответственно, при низких и высоких темпах роста населения). По словам Председателя МГЭИК повышение уровня моря (ПУМ) на 1 м к концу XX в. угрожает практически 300 млн людей [14]. Еще одну оценку дает английский ученый Robert J. Nicholls, согласно которой к 2080 г. в 5 раз больше людей окажутся под влиянием наводнений от штормовых нагонов по сравнению с 1990 г. при ПУМ на 38 см [15].

Повышение морского уровня имеет несколько прямых и косвенных неблагоприятных *последствий*, которые можно систематизировать на три (экономические, экологические и социальные) большие группы (табл. 2). Изучение их в глобальном и региональном масштабах представляет важнейшую задачу.

Таблица 2

Виды и типы неблагоприятных последствий от ПУМ

	Прямые последствия	Косвенные последствия
Экономические	Снижение эффективности прибрежной инфраструктуры, построенной над водой, (доки, пирсы, дамбы и т.п.) вследствие близости к уровню воды, или ее затопление	Нарушение нормального режима хозяйственной деятельности вне зоны разрушений из-за нарушения функционирования энергетических, транспортных и других коммуникаций и предприятий-смежников, а так же из-за непредвиденного отвлечения средств на восстановительные работы
Экологические	– Затопление низменных прибрежных участков суши, пляжей, в том числе практически постоянное затопление участков суши, которые уходили под воду только во время приливов, а также повышение уровня грунтовых вод; – вторжение соленой воды как в пресноводные эстуарии, так и в прибрежные водоносные слои, угрожающее водообеспеченности населения прибрежных районов; – усиление эрозии береговых утесов вследствие проникновения в них морской воды; – сокращение функциональной зоны заболоченных земель, которые служили в качестве защиты от наводнений и фильтрами для грунтовых вод – повышение интенсивности и частоты крупных штормовых нагонов, не без оснований считающееся одним из самых опасных последствий изменения климата	Загрязнение окружающей среды при разрушении стихией предприятий, на которых используются или производятся опасные для здоровья людей и природы материалы
Социальные	Вынужденная миграция населения, появление так называемых климатических беженцев	Потеря доверия людей к способности руководства защитить их от бедствий, в усилении социальных разногласий

Из анализа отрицательных последствий роста УМО следует, что в большей степени пострадают такие отрасли хозяйственной деятельности как туризм, рекреация, аквакультура, сельское хозяйство, транспортное сообщение, а также под сильной угрозой окажутся прибрежные среды обитания и экологическая обстановка в целом.

Названные последствия повышения уровня крайне неблагоприятны в силу следующих фактов. В мире приблизительно 2 млн км^2 территорий находятся менее 2 м над средней верхней границей прилива. Именно эта пограничная зона между землей и океаном характеризуется особенно разнообразными экосистемами и именно её предпочитает для своей жизни человек. По данным на 1995 г. около 60 млн человек проживали на землях, находящихся менее 1 м выше уровня моря и 275 млн – менее 5 м [16]. Восемь из десяти крупнейших городов мира находятся на низменных прибрежных территориях, в том числе Нью-Йорк и Токио, а темпы роста численности населения в таких зонах в два раза превышают среднемировой показатель. К концу XX в. в прибрежных зонах (ПЗ) не выше 1 м над уровнем моря будут проживать уже 130 млн, а в зонах не выше 5 м – 410 млн чел. Например, в США в ПЗ, составляющей около 17% всей территории страны, проживает более половины ее населения. В 2003 г. примерно 153 млн чел. (53 % населения) жило в 673 прибрежных округах США, увеличившись на 33 млн чел. с 1980 г. по данным [17]. Что касается Российской Федерации, то в приморских районных муниципальных образованиях проживает 12,6 млн человек (данные на 01.01.2007), что составляет примерно 9 % всего населения страны. ПУМ только на 40 см в Бенгальском заливе приведет к затоплению 11 % прибрежной зоны Бангладеш и возникновению 7–10 млн беженцев [18], большая часть территории которой находится в зоне не выше 10 м над уровнем моря [19].

Наибольшее число людей, живущих в низменных районах, приходится на следующие страны: Китай, Индия, Бангладеш, Вьетнам, Индонезия, Япония, Египет, США, Таиланд и Филиппины. При этом наибольшая доля населения, проживающего в низменных районах, сосредоточена в странах: Суринам, Голландия, Багамы, Вьетнам, Гайана, Бангладеш, Джибути, Белиз, Египет и Гамбия. К сожалению, многие страны, наиболее чувствительные к повышению уровня моря (ПУМ), не имеют достаточных ресурсов для подготовки к его последствиям.

В литературе [20] обычно рассматривается три вида *ущерба* от повышения уровня моря: 1) дополнительные капитальные затраты на берегоохранные сооружения, 2) убытки, связанные с потерями прибрежных земель, 3) затраты из-за более частых наводнений. Однако в некоторых случаях в ущерб дополнительно включаются затраты на вынужденное переселение людей, ущерб от интрузии солености и другие факторы.

Исследования, посвященные оценке таких экономических ущербов от ПУМ, можно подразделить в зависимости от масштаба территории, охватывае-

мой анализом: 1) на мировом уровне с региональными и национальными макрооценками (например, Hoozemans et al., 1993; Fankhauser, 1998, Tol, 2002; 2006), 2) на макро-региональном уровне (например, Fankhauser, (1994); Yohe и др. (1996); Yohe и Schlesinger, (1998) для США; Nicholls and Klein, (2003);CEC, (2007), для Европы), 3) на национальном уровне (например, Dennis *et al.*, (1995) для Сенегала, Volonte и Nicholls, (1995) для Уругвая, Volonte и Arismendi, (1995) для Венесуэлы, Morisugi и др. (1995) для Японии, Zeider (1997) для Польши) и 4) на локальном уровне (например, Gambarelli и Goria(2004) для Fondi plane в Италии, Breil и др. (2005) для Венеции, Smith и Lazo (2001) для Таллинна и Пярну, Эстония, и дельты Джуджан в Китае, Saizar (1997) для Монтевидео) [21].

Одним из выдающихся примеров исследований ПУМ на национальном уровне является программа Foresight (с англ. предвидение), запущенная в 1993 г. правительством Великобритании как инструмент реализации Белой книги в целях обеспечения тесного взаимодействия между учеными, промышленностью и правительством и открытия будущих возможностей и угроз научной инженерии и технологиям [22]. Целью этой программы, рассматривающей экономические, социальные и экологические аспекты воздействия наводнений, является долгосрочный прогноз (на период 30–100 лет) возможных будущих наводнений на Британских островах и разработка необходимых мер по защите прибрежной зоны.

Заметим, что Программа носит комплексный характер и ориентирована на различные сценарии изменений климата, обусловленные быстрым ростом в атмосфере парниковых газов. Размах оценок повышения уровня – от 31 см в Юго-Западной Шотландии при сценарии низкого уровня эмиссии CO_2 до 74 см в Юго-Западной Англии при высоком уровне выбросов. Под угрозой поводков и затопления прибрежных областей в Великобритании находится около 2 млн хозяйств, а под угрозой так называемых внутригородских наводнений, вызванных сильными ливнями, которые затапливают городские канализационные системы, – 80 тыс. домов в городах. Только в Англии и Уэльсе под угрозой находятся более 4 млн человек и сооружений, а ущерб оценивается в £200 млрд.

Если политика действий в области управления наводнениями и затраты на нее не изменятся, то к 2080 г. ежегодные потери будут увеличиваться в любом из разработанных сценариев, варьируя в пределах £1–27 млрд. При текущем уровне затрат на строительство берегозащитных сооружений значительно усилится береговая эрозия, а средний ущерб увеличится в 3–9 раз к 2080 г., хотя в наихудшем случае (£126 млн в год) он будет меньше, чем текущие потери от наводнений (£1 млрд в год). При этом число людей, подверженных риску наступления поводков и затопления прибрежных областей, может увеличиться от 1,6 млн чел. в настоящее время до 2,3–3,6 млн чел. к 2080 г., а риску усиления внутригородского наводнения, вызванного короткопериодными явлениями, – от 200 тыс. чел. до 700–900 тыс. чел.

Экономические исследования последствий повышения уровня Мирового океана начались более 20 лет назад в США [23, 24, 25, 26, 27]. В них в основном оценивались затраты на строительство защитных сооружений и *прямой ущерб* от линейного ПУМ на 1 м к концу XX1 в., суммарные значения которых варьировались от US$36 [28] до US$321 млрд [23]. Это значительное расхождение оценок даже у одних и тех же авторов вызвано различными методологиями подсчета последствий ПУМ. Прямой ущерб связывают с непосредственным физическим контактом вод с хозяйственными объектами, а величина такого ущерба определяют затратами на восстановление хозяйства или текущей рыночной стоимостью разрушенных (или нарушенных) хозяйственных объектов. При этом не вводятся поправки на «ценность» денег (например, паритет покупательской способности или веса), что приводит к переоценке абсолютных значений возможных негативных влияний ПУМ [21]. Таким же образом оценивается ущерб от нарушения или разрушения жилых построек и имущества, находящегося в них, а также от разрушения мостов, автомобильных и железных дорог, линий связи и электропередачи, газо- и нефтепроводов. Например, в сельском хозяйстве ущерб определяется в большинстве случаев потерями сельскохозяйственной продукции, затратами на восстановление нарушенного плодородия почв. В него включают также затраты на выплаты по страхованию имущества в случае стихийных бедствий, единовременные выплаты денежных и натуральных пособий, а также затраты на организацию спасательных мероприятий, строительство временных защитных сооружений и т.п. [29].

В этом подходе изменение стоимости вследствие количественного изменения не берется в расчет, т.к. дается сама цена, а не кривая спроса-предложения. Более того, он не рассматривает, как изменение на одном рынке влияет на другой или как влияние одной страны распространяется на другие страны посредством торговли. Прямые ущербы являются частью суммарных экономических последствий изменения климата (*косвенных ущербов*), так как они влияют практически на все остальные отрасли экономики [30]. Например, ущерб, причиненный коммерческому сектору, приведет к меньшему доходу владельцев бизнеса, что, в свою очередь, приведет к меньшим тратам, дополнительно снижая экономическую деятельность в других секторах экономики. Это же касается сельского хозяйства, спад в котором приведет к спаду агропромышленного комплекса и т.д.

В исследованиях конца XX в. начали применяться различные модели, позволяющие получить оценки косвенных ущербов (потери из-за нарушения хозяйственных связей, спада производства, торговых и банковских операций и т.п.), моделировать и учитывать реакцию экономики через перераспределение ущербов за счет других отраслей и посредством международной торговли. Например, исследование суммарных экономических последствий, учитывающих косвенные эффекты совместно с прямыми, может быть осуществлено с помощью численных моделей общего (рыночного) равновесия (CGE) [31, 30, 21 и

др.]. В частности, в работе [30] использовался метод, предложенный Фанкхаузером еще в 1995 г. [27] для расчета оптимального уровня защиты и была введена оптимальная стоимость в численную модель общего равновесия посредством сокращения обеспечения землей. Было показано, что глобальные материальные потери будут примерно на 13 % выше прямых затрат, хотя некоторые регионы подвергнутся меньшему ущербу от ПУМ благодаря перераспределению их ущербов посредством международной торговли. Однако необходимы дальнейшие исследования этой модели.

Численные модели общего равновесия (CGE) представляют собой класс экономических моделей, которые используют текущие экономические данные для оценки возможной реакции экономики на изменения в политике действий, технологиях и других внешних факторах. Они состоят из уравнений, описывающих переменные модели и баз данных, соответствующих уравнениям модели, которые в свою очередь обычно представляют собой результаты производителей при минимизации затрат, ценообразование по формуле "средние издержки плюс прибыль" и спрос домохозяйств на основе стремления к оптимизации результатов и др.

Базы данных CGE состоят из:

1) таблиц рыночных стоимостей (обычно в виде таблицы межотраслевых балансов или матрицы счётов для анализа социальных аспектов экономического процесса), охватывающей всю экономику страны (или всего мира) и выделяющей ряд секторов, сырьевых товаров, первичных факторов и в некоторых случаях видов домохозяйств;

2) значений эластичности (безразмерного параметра, который улавливает поведенческую реакцию потребителей).

Модели CGE являются последователями модели «затраты-выпуск», предложенной В. Леонтьевым, но в первых большая роль уделяется ценам. Там, где Леонтьев предполагал, что для производства одной тонны железа необходимо фиксированное количество труда, в модели CGE уровни зарплат влияют, причем обычно негативно на спрос на рабочую силу.

Существует несколько разновидностей моделей CGE:

– сравнительно-статичные, моделирующие реакцию экономики только в одной точке времени (на один или несколько внешних шоки),

– динамические, отслеживающие каждую переменную во времени,

– пошагово-динамические, решаемые последовательно (один период за раз) [32].

Рассмотрим экономические последствия (ущербы) от ПУМ на основе работ [33, 34, 35].

Методология вышеназванных работ в целом схожа, различаются лишь инструменты (программы) для получения оценок. На рис. 3 приведены основные этапы и инструменты методологий (слева – «2» и «3», справа – «1»), а их основные характеристики даны в табл. 2. Следует отметить, что в каждой из работ

оценивается прямой ущерб, а в Европейском отчете дополнительно приводятся оценки косвенного ущерба от ПУМ и в целом от глобального изменения климата. Однако в последнем исследовании в отличие от двух других не производится дисконтирование оценок предполагаемых ущербов и не вносятся поправки по паритету покупательской способности, а текущая экономика проецируется на рассматриваемые будущие периоды.

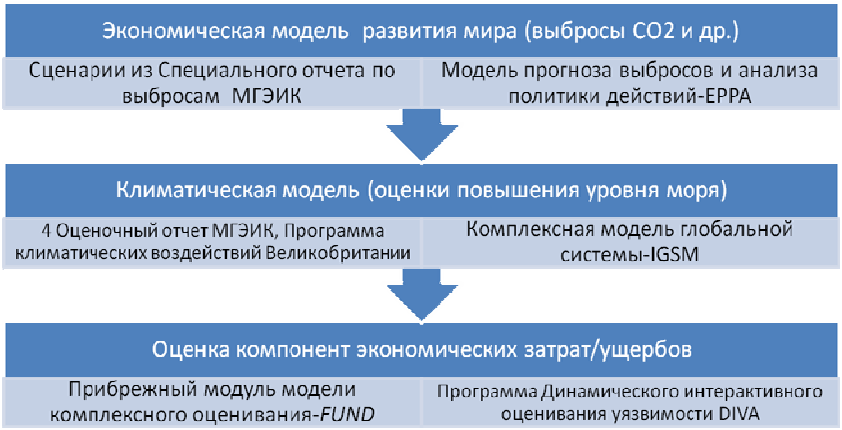


Рис. 3. Этапы оценивания экономических ущербов/затрат от ПУМ

Таблица 3

Основные характеристики трех рассматриваемых исследований [33, 34, 35]

	Sugiyama	Nicholls, Tol	PESETA
1	2	3	4
Сценарий ПУМ	Комплексная модель глобальной системы IGSM, Массачусетский технологический институт, США Линейный (аналитические оценки нелинейного)	0,5 м, 1,0 м, 2,0 м к 2100 г. (за 95 лет) Линейный	Региональные климатические модели, являющиеся частью глобальной циркуляционной модели 48–58 см и 88 см (из Третьего и Четвертого оценочного отчета МГЭИК)
Сценарий СЭР	Модель прогноза выбросов и анализа политики действий EPPA, Массачусетский технологический институт, США	Сценарии из Специального отчета по выбросам парниковых газов МГЭИК (A1, A2, B1, B2)	Сценарии из Специального отчета по выбросам парниковых газов МГЭИК (A2 с высоким уровнем выбросов и B2 – с низким)
Отчетный период	2100 г.	2100 г.	2020 г. и 2080 г.
Регионы	Мир	Мир	Европа (Британские о-ва, северная, южная, центральная южная и центральная северная)

Окончание табл. 3

1	2	3	4
Компоненты затрат	Затраты на защитные меры Капитальные потери (потеря земель) Стоимость потери болот Увеличение водно-болотных угодий вследствие решения не строить прибрежные защитные сооружения	Стоимость потери земель Стоимость потери болот (wetland) Затраты на защиту (включая дамбы) от ПУМ Издержки на переселение людей	Ущерб от затопления Ущерб от интрузии солености Затраты на миграцию, вызванной потерей земель Затраты на адаптационные меры Затраты на строительство дамб
Методы внесения поправок	ППС (паритет покупательской способности)	Дисконтирование, взвешивание капитала (из-за неравной ценности денежных единиц в мире)	Недисконтированные монетарные эффекты, рассматривается влияние будущего климата на сегодняшнюю экономику
Тип ущерба	Прямой ущерб	Прямой ущерб	Прямой и косвенный ущерб

Перед анализом оценок, полученных в описанных выше исследованиях, обратимся к одной из предыдущих работ, выполненной авторами «Экономического воздействия существующего ПУМ» в 2006 г. в рамках подготовки обзора Стерна по Экономике изменения климата [36]. Авторы, используя методы ГИС, выполнили анализ подверженности мировых территорий внешнему воздействию от различных ПУМ (1, 5 и 10 м) по площади, населению и сосредоточенному в этих районах ВВП. Из рис. 4, представляющего результаты их расчетов при ПУМ на 1 м, видно, что наиболее подверженной территорией в мире является Азия, на мегадельты и дельты которой приходится более 75 % всего населения, а большая часть оставшихся 25 % приходится на дельты Африки. На правой диаграмме приведена ежегодная доля ВВП по рыночному валютному курсу (т.е. без корректировок), сосредоточенная в 1-метровой зоне над уровнем моря и показывающая, что, несмотря на менее значительные потенциально теряемые площади, сосредоточенный на них ВВП лишь немного уступает ВВП Азии.

В последующем исследовании [34] авторы также рассчитали как глобальные оценки, так и региональные при ПУМ на 0,5 м, 1 м и 2 м к 2100 г. На рис. 5 голубым цветом приведены глобальные оценки, полученные при ПУМ на 1 м и наличии адаптационных мер как с учетом весов, так и без них. Нетрудно видеть, что при внедрении весов, подразумевающих, что доллар для бедных представляет собой большую ценность, чем для богатых, оценка ущербов увеличивается практически вдвое. Серым цветом нанесены разбросы оценок по [34], авторы которых в качестве поправки применяли показатель паритета покупательской способности. Из рис. 5 видно, что если начальные оценки глобальных ущербов были фактически одинаковы, составляя чуть более 1 триллиона долларов США и согласуясь с предыдущей оценкой ВВП [36], сосредоточенного на территориях ниже 1 м над уровнем моря – 944 млрд долл., то при учете поправок они увеличились практически в 4 раза и стали превышать оценки второго исследования в 2 раза.

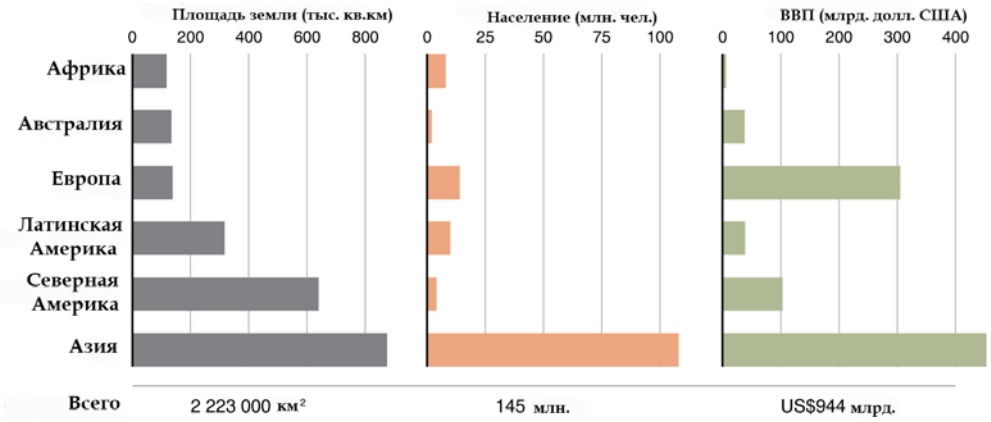


Рис. 4. Население, площадь и экономика, находящиеся под угрозой глобального повышения уровня моря на 1 м (мировые и региональные оценки, основанные на текущей ситуации) [36]

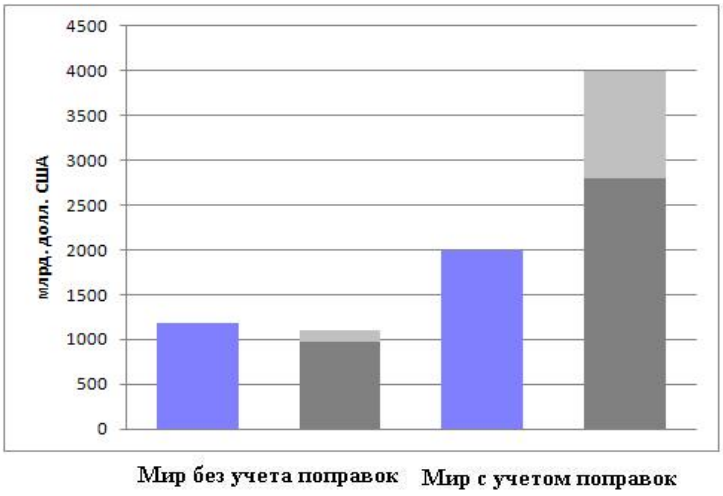


Рис. 5. Оценки глобальных ущербов от ПУМ на 1 м по [33]-голубым цветом, по [34] – серым

Обратимся к методологии расчета ущербов от ПУМ для Европы [35], предложенной Совместным исследовательским центром Европейской комиссии и учитывающей косвенные ущербы и влияние международной торговли, но не использующей поправки и методы дисконтирования. На рис. 6 и 7 приведены полученные согласно данной методике оценки ущербов для ЕС при наличии и отсутствии адаптационных мер. Очевидно, что при повышении уровня моря и строительстве защитных сооружений, ущербы увеличиваются линейно, а при отсутствии таковых и включении данных [37] – экспоненциально, из чего можно сделать вывод о крайней необходимости адаптационных мер для территории Европейского Союза. По полученным трендам легко восстановить ущербы/затраты для любого ПУМ.

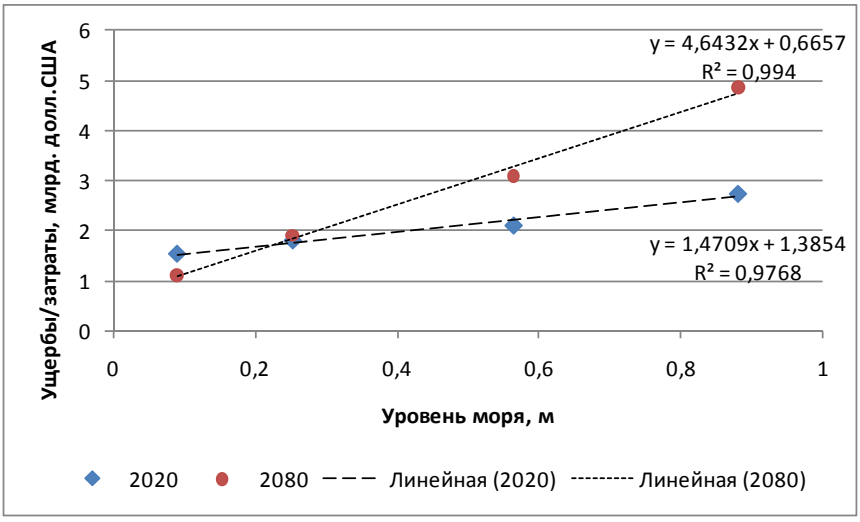


Рис. 6. Оценки ущербов при условии защитных мер по [35]
в зависимости от уровня моря в 2020 и 2080 гг. и их тренды

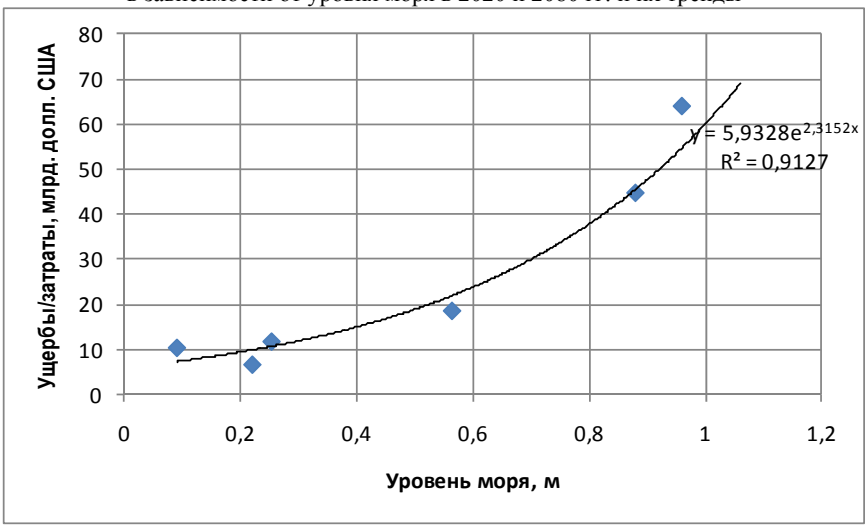


Рис. 7. Оценки ущербов при отсутствии защитных мер по [35, 37]
в зависимости от уровня моря и их тренды

Выводы

Предложена простая линейная статистическая зависимость изменений глобального уровня океана от приповерхностной температуры воздуха, позволяющая весьма просто в линейном приближении прогнозировать возможные изменения УМО в зависимости от изменений глобальной ПТВ на конец XXI в., которые практически не отличаются от результатов, основанных на использовании сложных и дорогих МОЦАО. Осуществлена систематизация прямых и косвенных неблагоприятных последствий повышения морского уровня на три (экономические,

экологические и социальные) группы. Обсуждается методология и приводятся количественные оценки экономических последствий (ущербов/затрат) от ПУМ, полученные тремя различными коллективами авторов [33, 34, 35], наиболее активно работающих по данной проблеме. Отмечается, что в работах [34, 36] глобальные оценки ущербов при линейном ПУМ на 1 м к 2100 г. в отсутствие корректировок, связанных с различной ценностью денег, примерно одинаковы и составляют порядка 1 триллиона долларов США, что коррелирует с оценкой ВВП, сосредоточенного в этой зоне, в предыдущих исследованиях. Показано, что для Европейского Союза крайне важным является принятие адаптационных мер в виде строительства берегозащитных сооружений и др. Это связано с тем, что при наличии защиты экономические ущербы увеличиваются линейно, а при их отсутствии – экспоненциально. Рассчитанные эмпирические зависимости позволяют оценивать ущерб при любом ПУМ в диапазоне 0,1–1,0 м.

Литература

1. *Малинин В.Н., Гордеева С.М., Шевчук О.И.* Изменчивость уровня Мирового океана за последние 140 лет // Ученые записки, 2007, вып. 4, с. 125–132.
2. *Nerem R.S., Chambers D.P., Leuliette E.W., Mitchum G.T.* Satellite Measurements of 14 Sea level Change. Where have been and where are we going? 2006. http://earth.esa.int/cgi-bin/confalt15y.pl?abstract=1092.
3. IPCC. Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change // Eds. Houghton, J.T. et al. Cambridge; New York, Cambridge university press. 2001. 881 p.
4. IPCC. Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Intergovernmental Panel on Cli-mate Change Fourth Assessment Report Climate Change 2007 // Eds. Bernstein L. et al., Cam-bridge; New York, 1. Малинин В.Н. Изменчивость глобального водообмена в условиях меняющегося климата // Водные ресурсы, 2009, № 1. Cambridge university press. 2007. 940 p.
5. Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Техническое резюме. – М.: Росгидромет, 2008. – 89 с.
6. Климат России в XXI веке. Ч. 1. Новые свидетельства антропогенного изменения климата и современные возможности его расчета / В.П. Мелешко, В.М. Катцов, В.М. Мирвис, В.А. Говоркова, Т.В. Павлова // Метеорология и гидрология, 2008, № 6, с. 5-19.
7. *Малинин В.Н.* Изменчивость глобального водообмена в условиях меняющегося климата // Водные ресурсы, 2009, № 1.
8. *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.
9. *Малинин В.Н., Шевчук О.И.* О возможных изменениях уровня Мирового океана в ближайшие десятилетия // Общество. Среда. Развитие, 2009, № 2, с. 172-180.
10. *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.
11. *Church J.A., White N.J.* A 20th century acceleration in global sea-level rise // Geophysical Res. Letters. 2006. Vol. 33, L01602, doi:10.1029/2005GL02482627.
12. *Jevrejeva S.* Nonlinear trends and multiyear cycles in sea level records // J. Geophys. Res. 2006. Vol. 111.
13. *Stern N.H., S. Peters, V. Bakhshi, A. Bowen, C. Cameron, S. Catovsky, D. Crane, S. Cruickshank, S. Dietz, N. Edmonson, S.-L. Garbett, L. Hamid, G. Hoffman, D. Ingram, B. Jones, N. Patmore, H. Radcliffe, R. Sathiyarajah, M. Stock, C. Taylor, T. Vernon, H. Wanjie, D. Zenghelis* (2006), Stern Review: The Economics of Climate Change Cambridge University Press, Cambridge.
14. http://www.newscientist.com/article/mg12517001.300-rising-sea-levels-could-affect-300-million-.html
15. *Nicholls R.J., Lowe J.A.* (2006) Climate stabilisation and impacts of sea-level rise. In Avoiding Dangerous Climate Change (eds. H.J. Schellnhuber, W. Cramer, N. Nakicenovic, T.M.L. Wigley, and G.

Yohe). Cambridge University Press, Cambridge Nicholls, R.J. and Tol, R.S.J. (2006). Impacts and responses to sea level rise: a global analysis of the SRES scenarios over the twenty-first century. Philos. Trans. R. Soc. Lond. A, 364, 1073-1095.
16. http://climaty.ru/node/23 – Интернет-сайт «Климати.ру – о глобальном потеплении с научной точки зрения».
17. *Kristen M. Crossett, Thomas J. Culliton, Peter C. Wiley, Timothy R. Goodspeed* (2004). Special ProjectsNOAA released Population Trends Along the Coastal United States: 1980-2008.
18. IPCC (2007b), Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability,Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Parry M.L., et al. (Eds.), Cambridge University Press, Cambridge, UK.
19. http://www.globalwarmingart.com/wiki/Special:SeaLevel – Карты GoogleMaps чувствительности к повышению уровня моря.
20. *Житницкий Е., Фомин Б.* Глобальное изменение климата и экономика / "Общие проблемы постиндустриальной эпохи" / Московский общественный научный фонд, Институт мировой экономики и международных отношений РАН. М., 1999.
21. *Bigano A., Bosello F., Roson R., Tol R.*, 2008. "Economy-wide impacts of climate change: a joint analysis for sea level rise and tourism," Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change, Springer, vol. 13(8), pages 765-791, October.
22. http://www.foresight.gov.uk – Официальный сайт программ Foresight.
23. *Yohe G.* 1989. "The Cost of Not Holding Back the Sea – Economic Vulnerability." Ocean and Shore Management 15: 233-255.
24. *Smith J., Tirpak D.* "The Potential Effects Of Global Climate Change On The United States." United States Environmental Protection Agency, Report to Congress (1989).
25. *Titus J.G., Park R.A., Leatherman S.P., Weggel J.R., Green M.S., Mausel P.W., Brown S., Gaunt C., Trehan M., Yohe G.*. 1991. "Greenhouse Effect and Sea-Level Rise: Potential Loss of Land and the Cost of Holding Back the Sea." Coastal Management 19:171-204.
26. *Nordhaus W.D.* 1991. "To Slow or Not to Slow" // Economics J. 5:920-937.
27. *Fankhauser S.,* 1995, "Protection versus retreat: the economic costs of sea-level rise" Environment and Planning A 27(2) 299 – 319.
28. *Yohe G., Neumann J., Marshall P., Ameden H.,* 1996. The Economic Cost of Greenhouse-Induced Sea-Level Rise for Developed Property in the United States. Climatic Change, 32:387-410.
29. *Авакян А. Б.* Наводнения в прошлом, настоящем и будущем: концепция защиты // Использование и охрана природных ресурсов России, 2001, № 10, с. 43-49.
30. *Darwin R., Tol R.*, 2001. "Estimates of the Economic Effects of Sea Level Rise," Environmental & Resource Economics, European Association of Environmental and Resource Economists, vol. 19(2), pages 113-129, June.
31. *Deke O., Hooss K.G., Kasten Ch., Klepper G., Springer K.,* 2001. "Economic Impact of Climate Change: Simulations with a Regionalized Climate-Economy Model," Kiel Working Papers 1065, Kiel Institute for the World Economy.
32. http://en.wikipedia.org/wiki/Computable_general_equilibrium – Интернет-сайт электронной энциклопедии.
33. *Sugiyama M., Nicholls R.J., Vafeidis A.* (2008). Estimating the Economic Cost of Sea-Level Rise. Report No. 156. The MIT Joint Program on the Science and Policy of Global Change.
34. *Anthoff D., Nicholls R.J., Morgenroth E.L.W., Tol R.S.J.* (2010). "The Economic Impact of Substantial Sea-Level Rise," Working Papers FNU-175, Research unit Sustainability and Global Change, Hamburg University.
35. *Ciscar J.-C.* (editor) (2009). Climate change impacts in Europe. Final report of the PESETA research project.
36. *Anthoff D., Nicholls R.J., Tol R.S.J., Vafeidis, A.T.* (2006). Global and regional exposure to large rises in sea-level: a sensitivity analysis. Working Paper 96. Tyndall Centre for Climate Change Research, Norwich.
37. CEC (2007) Limiting Global Climate Change to 2 degrees Celsius The way ahead for 2020 and beyond. Commission Staff Working Document. Brussels.

СОЦИАЛЬНО-ГУМАНИТАРНЫЕ НАУКИ

П.П. Бескид, В.Н. Воробьев, В.Б. Митько, Т.М. Татарникова

ИННОВАЦИОННЫЙ ПОДХОД К ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫМ ТЕХНОЛОГИЯМ В ОБЛАСТИ МОРСКОГО ПРИБОРОСТРОЕНИЯ

P.P. Beskid, V.N. Vorobyev, V.B. Mit'ko, T.M. Tatarnikova

INNOVATIVE APPROACH TO EDUCATIONAL TECHNOLOGIES IN THE FIELD OF MARINE INSTRUMENTATION

На основе анализа существующих программ подготовки и переподготовки специалистов для отраслевых кластеров предлагается структура подготовки и переподготовки специалистов для кластера морского приборостроения. Целью предлагаемой структуры является формирование инновационной образовательной среды отрасли морского приборостроения, необходимой для непрерывной многоуровневой подготовки специалистов для кластера, направленной на достижение качественно нового уровня их профессиональной компетентности и ориентированной на социально-экономическое и культурное развитие региона.

Ключевые слова: морское приборостроение, образовательная технология, инновационный подход, отраслевой кластер, подготовка и переподготовка специалистов, качество образования, компетенция.

Based on analysis of existing training programs and retraining for industry clusters proposed structure of the training and retraining for a cluster of marine engineering. The purpose of the proposed structure is to create an innovative educational environment of the industry of marine instrumentation, necessary for the continuous multi-level training for the cluster to achieve a qualitatively new level of professional competence and customer-oriented socio-economic and cultural development in the region.

Keywords: marine instrumentation, educational technology, innovation, industry clusters, training and retraining of specialists, quality education, and competence.

Учитывая, что Россия является крупной морской державой, имеющей национальные интересы в различных районах Мирового океана, то необходимость иметь соответствующее этим интересам морское образование является одним из приоритетных направлений.

Развитие образования в области морских и информационно-коммуникационных технологий в России рассматриваются как один из основных факторов роста национальной экономики, интеграции страны в мировое информационное пространство.

В документе «Основы политики Российской Федерации в области развития науки и технологий на период до 2010 года и дальнейшую перспективу» отводится всего 8–10 лет для реформ научно-технической сферы. Проведение реформы за такой короткий период требует поиска механизмов эффективного использования научного и инновационного потенциала страны для решения поставленных задач. Одним из таких механизмов указывается создание научно-технических и технологических кластеров, позволяющий эффективно использовать научный и инновационный потенциал вузов, НИИ и других образовательных и научных учреждений.

В Северо-Западном федеральном округе кластерному подходу в развитии инновационной экономики и подготовки кадров в современных условиях уделяется особое внимание. Для Санкт-Петербурга перечень кластеров корректируется с учетом определения приоритетных направлений инновационного развития региона. Такие объекты, как, например, нефтеналивной порт в Приморске, строящийся порт в Усть-Луге, развитие судостроительных предприятий в Санкт-Петербурге и Калининграде определяют новые направления развития экономики, активизируют деятельность существующих компаний судостроительного кластера, в том числе и связанных с морским приборостроением.

Следствием этого фактора является потребность поиска инновационных подходов к образовательным технологиям в области морского приборостроения.

Совершенствование системы морского образования предполагает, прежде всего, повышение его качества. Для этого необходимо чтобы образование было непрерывным, а также гармонично сочетало теоретическое обучение с практической деятельностью.

Анализ существующих программ подготовки и переподготовки специалистов для отраслевых кластеров позволяет предложить следующую структуру подготовки и переподготовки специалистов для кластера морского приборостроения, структура которой представлена на рис. 1.

Целью предлагаемой структуры является формирование инновационной образовательной среды отрасли морского приборостроения, необходимой для непрерывной многоуровневой подготовки специалистов для кластера, направленной на достижение качественно нового уровня их профессиональной компетентности и ориентированной на социально-экономическое и культурное развитие региона. Структура должна быть составной частью общей программы развития вуза, осуществляющего процесс подготовки специалистов и стать своеобразным катализатором, ускоряющим процесс развития кластера.

Программа характеризуется наличием четырех функционально взаимосвязанных, взаимопроникающих и взаимодополняющих модулей: подготовки специалистов в рамках Федеральных государственных образовательных стандартов (ФГОС), включая довузовскую подготовку, учебно-инновационного и научно-инновационного модуля, модуля формирования инновационных и бизнес-компетенций.

Рис. 1. Обобщенная структура инновационного образовательного процесса в университетском комплексе

Указанная структура подготовки достаточно адекватно отражает современные требования мирового сообщества к специалистам и запросы рынка, как самой отрасли морского приборостроения, так и смежных отраслей государственного и частного сегментов экономики.

Функционирование модулей подготовки и переподготовки специалистов в рамках ФГОС обеспечивается факультетами очного и заочного обучений, институтами филиалов, колледжами и т.п., входящими в состав кластера морского приборостроения.

Федеральные Государственные образовательные стандарты позволяют обеспечить достаточно гибкую систему подготовки специалистов, удовлетворяющую как положениям Болонских соглашений, так и современным требованиям рынка отрасли и смежных отраслей.

Инфраструктура учебно-инновационного модуля включает в себя центр переподготовки специалистов, осуществляющий также и дистанционное обучение; полигоны проведения практик, лаборатории новой техники при выпускающих кафедрах; подразделения кафедр на предприятиях.

Научно-инновационный модуль опирается на научные школы. В состав научно-инновационного комплекса входят: научные центры, межотраслевые и отраслевые научно-исследовательские лаборатории, научно-исследовательские сектора вузов и филиалов, научно-исследовательские лабораторий при кафедрах, отдел аспирантуры и докторантуры, патентно-информационная служба, отдел маркетинга и другие вспомогательные подразделения.

В пределах модуля формирования инновационных и бизнес-компетенций реализуется инновационный процесс развития и закрепления у выпускников университета деятельностных индивидуальных способностей, определяющих их умение грамотно и эффективно решать комплексные профессиональные задачи, ориентироваться в рыночной организационной среде наукоёмкого бизнеса, квалифицированно реализовывать свои планы, используя современные технологии. Инфраструктуру модуля призваны обеспечивать: кафедры океанологического, экономического и гуманитарного факультетов, студенческое конструкторское бюро.

Интеграция фундаментальных и прикладных научных исследований с учебным процессом является определяющим условием построения системы качественного профессионального образования, стимулирующим переход на новый качественный уровень и всех остальных атрибутов образовательной деятельности.

Формирование инновационных и бизнес-компетенций специалистов в сфере наукоёмких технологий определяется требованиями современных рыночных отношений и способствует повышению их конкурентоспособности на рынке.

Влияние программы подготовки и переподготовки специалистов для кластера на внешнее сообщество и развитие самого кластера иллюстрируется рис. 2.

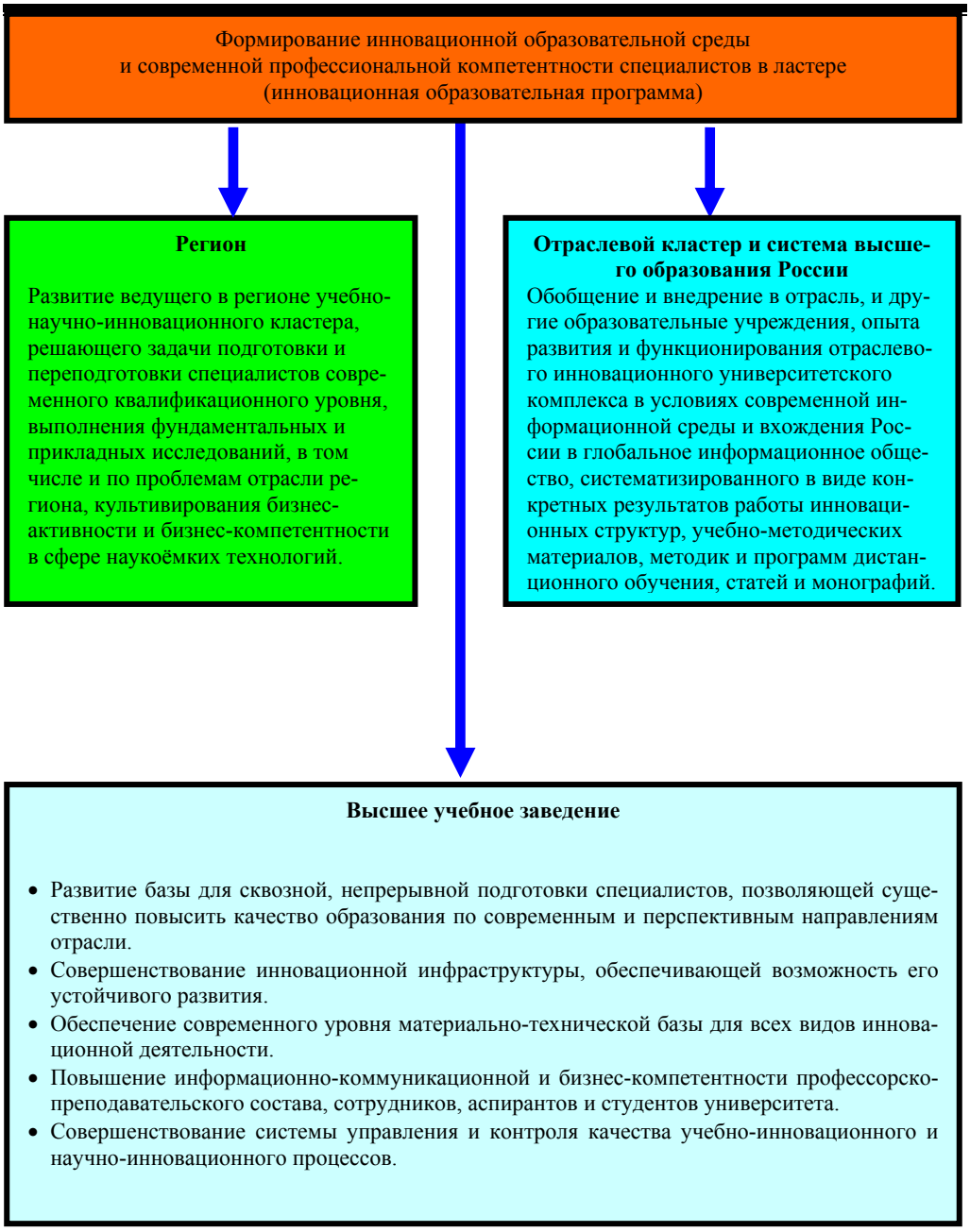


Рис. 2. Влияние программы подготовки и переподготовки специалистов для кластера на внешнее сообщество и развитие кластера

Главным результатом реализации образовательной программы для самого кластера станет формирование инновационной образовательной среды в отрасли, обеспечивающей качественно новые возможности в развитии и совершенствовании процесса обучения, системы управления учебным процессом и форм взаимодействия с внешней средой.

Непосредственным результатом реализации программы подготовки и переподготовки специалистов для кластера станет выход кластера на качественно новый уровень своего развития. Это выразится в возможности решения следующих общих проблемно-ориентированных задач:

– постоянное системное совершенствование образовательного процесса с целью достижения современного уровня качества подготовки и переподготовки специалистов отрасли;

– достижение и поддержание современного уровня информационно-технического обеспечения образовательной, научной и административно-управленческой деятельности;

– интеграция фундаментальных исследований и учебного процесса, ориентация на полный инновационный цикл прикладных исследований;

– развитие и совершенствование инновационных инфраструктур кластера, обеспечивающих современное качество учебно-научно-инновационной деятельности.

– развитие системы активной поддержки творческой инициативы студентов в области современных технологий;

– повышение уровня профессиональной компетентности профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников и учебно-вспомогательного персонала;

– развитие и совершенствование университетской системы менеджмента качества образовательного процесса и инновационной деятельности;

– развитие и совершенствование системы стимулирования и повышения мотивации творческой активности преподавателей, сотрудников и студентов;

– развитие бизнес-активности и бизнес-компетентности студентов, преподавателей и выпускников университета в сфере наукоёмких технологий.

Процедура реализации программы подготовки и переподготовки специалистов для кластера может быть реализована посредством решения ряда локальных задач, которые сгруппированы по трем взаимосвязанным, взаимопроникающим и взаимодополняющим модулям подготовки и переподготовки специалистов в вузах: учебно-инновационному, научно-инновационному и модулю формирования инновационных и бизнес-компетенций.

Учебно-инновационные задачи программы подготовки и переподготовки специалистов для кластера:

– Разработка и реализация инновационной методологии и методического обеспечения подготовки специалистов при изучении общетехнических и специ-

альных дисциплин на основе глубокой интеграции учебного процесса, научных исследований и производственной деятельности.

– Адаптация с учетом требований работодателей учебных программ для формирования и развития системы подготовки специалистов и магистров, сочетающей фундаментальное образование с углубленной практической подготовкой в области современных отраслевых технологий.

– Существенная модернизация содержания лабораторных и практических занятий, курсовых и дипломных работ, создание современной учебно-научной лабораторной базы (с использованием современных интегрированных программно-аппаратных комплексов), обеспечивающей эффективную реализацию инновационной подготовки специалистов.

– Разработка и практическая реализация методологии проведения лабораторных работ с элементами научных исследований на основе сочетания современных методов аппаратурных исследований и возможностей компьютерного моделирования процессов в различных системах, обеспечиваемых современными программно-аппаратными средствами.

– Разработка новых курсов учебных дисциплин по различным специальностям вуза, написание учебников, учебных пособий, лабораторных практикумов и методических указаний на базе использования современных информационных технологий обучения (электронные учебные пособия).

– Развитие системы обучения на английском и немецком языках учебных дисциплин по техническим и экономическим специальностям.

– Подготовка научно-педагогических кадров через аспирантуру и докторантуру, повышение квалификации и обучение профессорско-преподавательского состава и сотрудников современным технологиям, используемым в инженерном образовании и научных исследованиях.

– Внедрение инновационных технологий дистанционного обучения в очную и заочную формы основного и дополнительного образования.

– Создание виртуального университета и его представительств в российском портале открытого образования.

– Развитие существующих и создание новых учебно-научных центров, полигонов новой техники, лабораторий с инновационной направленностью подготовки специалистов по различным образовательным программам, направлениям и специальностям в рамках лицензированной деятельности университета для повышения качества подготовки его выпускников и переподготовки специалистов для кластера и смежных отраслей экономики региона.

– Разработка и развитие материально-технической базы для предоставления студентам и аспирантам возможности изучения самых современных отраслевых технологий.

– Повышение качества образования для кластера, сохранение и развитие научных школ в данных областях.

– Подготовка конкурентоспособных специалистов для кластера на основе развития качественно новой формы интеграции учебного процесса и научных исследований, обеспечивающей более эффективное привлечение студентов, аспирантов и преподавателей в реальные НИОКР и инновационные проекты.

– Качественно новых учебно-методических комплексов по направлениям отраслевых технологий и систем современных и будущих поколений для подготовки специалистов, магистров и аспирантов, обладающих мировым уровнем компетентности и конкурентоспособности.

– Создание передовых лабораторно-практических баз по отраслевым технологиям включая, классы компьютерного тренинга и переподготовки специалистов.

– Формирование на основе междисциплинарной интеграции инновационных образовательных направлений, обеспечивающих непрерывную сертифицированную подготовку и переподготовку специалистов для кластера, подкрепленных современной информационно-технической базой.

– Опережающее формирование преподавательского состава и уровня его профессиональной компетентности для решения задачи кадрового обеспечения кластера.

– Развитие системы активной поддержки самостоятельной работы студентов на базе дистанционных и компьютерных технологий.

– Осуществление *мониторинга уровня подготовки студентов* на разных этапах обучения.

Научно-инновационные задачи программы подготовки и переподготовки специалистов для кластера:

– Расширение спектра теоретических и экспериментальных исследований в отраслевых задачах кластера, а также исследований в пограничных областях, базирующихся на применении современных методов и технологий.

– Создание и подготовка к реализации на рынке конкурентоспособной наукоемкой продукции отраслевого профиля и оборудования специального назначения, имеющего мировой уровень показателя цена/качество.

– Сохранение и развитие ведущих научных школ в отрасли, проведение перспективных фундаментальных научных исследований и выполнение прикладных разработок, повышение качества современного инженерного образования, развитие системы индивидуального обучения на стадиях магистерской и аспирантской подготовки.

– Развитие материально-технической базы для целевой подготовки студентов, магистрантов, аспирантов, докторантов и выполнения НИОКР на современном научно-технологическом уровне, обеспечивающем внедрение разработок в серийное производство.

– Развитие межрегионального и межотраслевого взаимодействия вузов, специализирующихся в области морского приборостроения и информационных

технологий в освоении Мирового океана. Это в первую очередь Калининград, Мурманск, а также организации Финляндии, Эстонии, Латвии, Литвы.

– Повышение профессионального уровня и исследовательской активности профессорско-преподавательского состава, научных сотрудников, магистрантов, аспирантов и докторантов университета.

Формирование инновационных и бизнес-компетенций подготовки и переподготовки специалистов для кластера:

– Органическое соединение знаний глубинных процессов отрасли с социально-экономическими тенденциями развития региона.

– Формирование у выпускников вузов достаточной риск-менеджмент культуры.

– Формирование у специалистов навыков современной информационной деятельности.

– Интеграция образовательной, исследовательской и консалтинговой деятельности специалистов.

– Совершенствование образовательного процесса с усилением практической ориентированности дисциплин, направленных на совершенствование навыков организации системной инновационной деятельности на предприятиях отрасли.

– Повышение бизнес-компетентности субъектов инновационной деятельности на основе апробированных базовых образовательных практико-ориентированных курсов.

– Проведение мониторинговых социально-экономических исследований, повышающих транспарентность рынка и стимулирующих реализацию инновационного потенциала студентов и молодых специалистов предприятий и организаций.

– Развитие ресурсной базы для осуществления бизнес-исследований и повышения исследовательской компетентности и квалификационного уровня профессорско-преподавательского состава.

– Повышение мотивации студентов, аспирантов и молодых преподавателей к предпринимательской деятельности, создание условий для реализации молодежных инновационных проектов в отрасли, развитие инновационных и бизнес-компетенций в молодежной среде. Важным фактором развития этого направления явилось принятие закона № 217-ФЗ о создании при вузах инновационно-внедренческих предприятий в формате ООО. Это способствует не только коммерциализации знаний, но и подготовке соответствующих специалистов. Однако существует опасность уклона этой деятельности по принципу «вуз для малого предпринимательства», а не малое предпринимательство для развития наукоемкого и инновационного потенциала вуза.

Подводя итоги, можно сказать, что Программа подготовки специалистов в области морского приборостроения должна эффективно поддерживаться определенной технологией обучения, базирующейся на компетентностном подходе.

Введение компетентностного подхода связано с новыми требованиями, предъявляемыми к подготовке специалистов на всех квалификационных уровнях в современную эпоху. Специалист должен обладать высокой степенью самостоятельности, ответственности, должен быть готовым учиться в течение всей жизни. Его конкурентоспособность определяется не только степенью адаптации к сфере профессиональной деятельности, быстротой переобучения, овладения смежными профессиями, но и готовностью к непрерывному обучению, саморазвитию необходимых профессионально-личностных качеств, самообразованию. Гуманистическая парадигма современной российской высшей школы предоставляет человеку возможность самореализоваться, т.е. личность через возможности, которые обеспечивает вуз, строит собственную образовательную траекторию.

Литература

1. «Основы политики Российской Федерации в области развития науки и технологий на период до 2010 года и на дальнейшую перспективу» (Утв. Президентом РФ 30 марта 2002 г., Пр-576).
2. Приоритетные направления развития науки, технологий и техники РФ (Утв. Президентом РФ 30 марта 2002 г., Пр-577).
3. *Кривошеев А.О., Фомин С.С.* Создание и развитие системы повышения квалификации специалистов в области ИКТ // Междунар. научн. конф. "Информационные технологии и телекоммуникации в образовании и науке" (IT&T ES'2008).
4. *Ивченко В.В.* Очерки инновационной экономики приморских регионов России. – Калининград, 2006. – 182 с.
5. *Воробьёв В.Н., Бескид П.П., Митько В.Б.* Развитие инновационных технологий в научно-образовательном процессе Российского государственного гидрометеорологического университета // Тез. докл. Всероссийской конф. «Управление инновациями: теория, инструменты, кадры». – СПб., 2007.

ХРОНИКА

Коваленко Виктор Васильевич, профессор, доктор технических наук, Заслуженный деятель науки РФ, заведующий кафедрой гидрофизики и гидропрогнозов РГГМУ, награжден в мае 2010 г. Премией Правительства Санкт-Петербурга «За выдающиеся достижения в области высшего и среднего профессионального образования за 2010 г.».

Номинация: «Научные достижения, способствующие повышению качества специалистов и кадров высшей квалификации».

Заслуга – создание нового научного направления «Частично инфинитная гидрология», внедренного в научный процесс.

XXIII Международная береговая конференция в честь столетия со дня рождения профессора Всеволода Павловича Зенковича

Учение о развитии морских берегов: вековые традиции и идеи современности

С 5 по 9 октября в г. Зеленогорске проходила XXIII международная конференция «Учение о развитии морских берегов: вековые традиции и идеи современности», организаторами которой выступили Рабочая группа «Морские берега» Совета РАН по проблемам Мирового океана и Российский государственный гидрометеорологический университет, при поддержке Морского Совета при Правительстве Санкт-Петербурга. Конференция являлась вкладом в мероприятия к 50-летнему юбилею Межправительственной океанографической комиссии (МОК ЮНЕСКО).

Эта конференция стала продолжением серии подобных регулярно созываемых научных встреч с 1952 года, после того как был организован общесоюзный центр береговых исследований – Береговой секции (ныне Рабочая группа «Морские берега») по инициативе профессора В.П. Зенковича при Межведомственной океанографической комиссии АН СССР. Именно этому выдающемуся ученому-исследователю, основателю российской школы береговиков и посвятили конференцию: в этом году исполнилось 100 лет со дня его рождения.

На конференции прозвучали выступления более 100 ведущих специалистов в области динамики и морфологии прибрежных зон, они представляли десятки российских городов – от Калининграда и Сочи до Владивостока и Южно-Сахалинска. В работе конференции также участвовали зарубежные исследователи из стран Прибалтики, Украины, Испании, Италии, США и других стран.

Участники конференции рассмотрели новые и традиционные идеи в гидролито- и морфодинамике береговой зоны моря, экологические проблемы и проблемы охраны береговой среды, палеогеографические условия и факторы устойчивого развития береговой зоны и прибрежных акваторий. В ходе дискуссий по представленным докладам была отмечена всё возрастающая роль береговой зоны в хозяйственном и рекреационном развитии регионов, в решении вопросов социальной значимости, а также в успешных решениях задач гидротехнического строительства близ моря. В очередной раз остро был поднят вопрос об отсутствии единого терминологического аппарата и собственно законодательного статуса береговой зоны, что лишает юридической основы пользователей ее ресурсами.

Научная экспедиция РГГМУ в августе 2010 г. в Балтийском море

В период с 3 по 10 августа 2010 г. Российским государственным гидрометеорологическим университетом (РГГМУ) совместно с Таллиннским техническим университетом (ТТУ) была проведена комплексная научная экспедиция в центральной и северной частях Балтийского моря и западной части Финского залива в рамках выполнения Федеральной целевой программы «Мировой океан». Экспедиция проводилась на борту НИС «Сальме», принадлежащего Институту морских систем ТТУ. В процессе экспедиционных работ было проведено изучение гидрофизических, гидрохимических и гидробиологических процессов и их изменчивости в открытой и прибрежной зонах Балтийского моря и Финского залива, а также выполнена оценка экологического состояния вод Балтийского моря. Исследования проводились на станциях международной программы Балтийского мониторинга (ХЕЛКОМ). Был продолжен многолетний ряд наблюдений за изменчивостью морской среды, включая биологические процессы в отдельных районах Балтийского моря. В работах экспедиции приняли участие сотрудники и аспиранты РГГМУ, ТТУ, а также сотрудники Университета Тарту (всего 10 человек). В период экспедиции судно посетило эстонский остров Сааремаа, где участникам экспедиции был оказан дружественный прием администрацией порта, а в честь российских участников экспедиции в порту Курессааре был поднят Российский флаг.

МЕЖДУНАРОДНАЯ ЛЕТНЯЯ ШКОЛА
28 июля – 9 августа 2010 года
"Пресноводные экосистемы в естественных условиях и при антропогенной нагрузке. На примере ладожского озера"

Работа по организации и проведению летней школы "Пресноводные экосистемы в естественных и антропогенных условиях" проводится при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009–2013 годы.

Место проведения: Санкт-Петербург (РГГМУ), Учебно-научная станция РГГМУ (Ладожское озеро, о. Валаам)

Организатор: Кафедра прикладной экологии, факультет экологии и физики природной среды РГГМУ

Целевая группа: Студенты-магистры

Полевые исследования: Изучение морфометрических параметров, температурного режима, базовых гидрохимических и гидрофизических параметров, фитопланктона, зоопланктона, макрофитов, макрозообентоса, а так же первичной продукции планктона.

Список авторов

Аль Бухайри Осама Ахмед, асп. каф. экологии РГГМУ (812)224-16-59
Бабкин Алексей Владимирович, д.г.н., проф. каф. ДАКЗ 812) 444-59-47
Барышников Николай Борисович, д.т.н., проф., зав. каф. гидрометрии РГГМУ (812) 444-82-61
Бескид Павел Павлович, д.т.н., проф., зав. каф. МИТ РГГМУ (812)224-30-39
Боков Виктор Николаевич, к.т.н., доц. каф. метеопрогнозов РГГМУ (812) 444-82-61
Бузин Владимир Александрович, д.т.н., проф. каф. гидрометрии РГГМУ (812) 444-82-61
Викторова Наталья Владимировна, к.т.н., доц. каф. гидрофизики РГГМУ (812) 444-82-61
Гаврилов Илья Сергеевич, асп. каф. гидрологии суши РГГМУ (812) 444-82-61
Гайдукова Екатерина Владимировна, к.т.н., зав. лаб. математического моделирования гидрологических процессов, каф. гидрофизики РГГМУ (812)444-82-61
Грачев Николай Ричардович, к.т.н., гл. спец. ЗАО "УНИКУМ" (812)246-89-04
Григорьева Евгения Геннадьевна, нач. сектора ИВЦ РГГМУ (812) 224-16-59
Громова Мария Николаевна, к.т.н., зав. Бюро гидрологических прогнозов РГГМУ (812) 444-82-61
Девятков Владимир Сергеевич, асп., инж. каф. гидрофизики РГГМУ (812) 444-82-61
Дьяченко Наталья Юрьевна, к.ф.-м.н., доц. каф. физики РГГМУ (812) 224-06-97
Ислим Хассан, асп. каф.ДАКЗ РГГМУ (812) 444-59-47
Коваленко Виктор Васильевич, д.т.н., проф., зав каф. гидрофизики РГГМУ (812) 444-82-61
Кузьмин Вадим Александрович, д.т.н., доц. каф. гидрологии суши РГГМУ (812) 444-82-61
Лобанов Владимир Алексеевич, д.т.н., проф. каф. МКОА РГГМУ(812)224-30-39
Лукина Маргарита Николаевна, студ. гидрологического ф-та РГГМУ (812) 444-82-61
Малинина Юлия Валериевна, соискатель, асс. каф. ин.яз. РГГМУ (812)224-06-49
Митько Валерий Брониславович, д.т.н., проф. каф. МИТ РГГМУ (812)224-30-39
Морозова Светлана Владимировна, к.г.н., доц. каф. метеорологии Саратовского ГУ 8-904-700-02-23
Морозов Евгений Александрович, асп. каф. ЮНЕСКО дистанционного зондирования океана и моделирования в океанографии (812) 526-31-65
Моцаков Максим Анатольевич, асп. каф. метеопрогнозов РГГМУ (812) 444-82-61
Нгонголо Хашим, асп. каф. метеопрогнозов РГГМУ (812) 444-82-61
Поздняков Дмитрий Викторович, д.ф.-м.н., проф., зам. директора по науке Фонда «Нансен Центр» (812) 324-51-03
Смирнов Николай Павлович, д.г.н., проф., зав. каф. экологии РГГМУ (812) 444-41-36
Смыжова Елена Сергеевна, асп. каф. прикладной экологии РГГМУ (812)224-06-97
Смышляев Сергей Павлович, д.ф.-м.н., проф. каф. метеопрогнозов РГГМУ (812) 444-82-61
Соколова Татьяна Александровна, магистр гидрологического ф-та РГГМУ (812) 444-82-61
Солощук Полина Викторовна, асп. каф. ПО и ОПВ РГГМУ (812) 224-06-49
Сомова Наталья Владимировна, соискатель каф. психологии СПб академии постдипломного педагогического образования (АППС), зам нач. отдела международного образования РГГМУ (812) 444-05-60
Сычов Виталий Иванович, к.ф.-м.н., доц. каф. ЮНЕСКО дистанционного зондирования океана и моделирования в океанографии (812) 526-31-65
Татарникова Татьяна Михайловна, д.т.н., проф. каф. МИТ РГГМУ (812)224-30-39
Тимофеев Антон Юрьевич, студ. гидрологического ф-та РГГМУ (812) 444-82-61
Трубина Марина Августиновна, нач. ИВЦ РГГМУ (812) 224-16-59
Угренинов Геннадий Николаевич, к.т.н., доц.каф. гидрометрии РГГМУ (812) 444-82-61
Хаустов Виталий Александрович, к.т.н., доц. каф. гидрофизики РГГМУ (812) 444-82-61
Черемных Анна Владимировна, программист ИВЦ РГГМУ (812) 224-16-59
Шадурский Антон Евгеньевич, асп., асс. каф. МКОА РГГМУ(812)224-30-39
Шевнина Елена Валентиновна, к.т.н., докторант каф. гидрофизики РГГМУ, с.н.с. ААНИИ (812) 444-82-61
Шелутко Владислав Аркадьевич, д.г.н., проф., зав. каф. прикладной экологии РГГМУ (812) 224-06-97
Шилов Дмитрий Владимирович, мл.н.с. ИГЭИ РГГМУ (812) 444-41-36

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

№ 14

НАУЧНО-ТЕОРЕТИЧЕСКИЙ ЖУРНАЛ

Редакторы: И.Г. Максимова, Л.В. Ковель
Компьютерная верстка Н.И. Афанасьевой
ЛР № 020309 от 30.12.96.

Подписано в печать 29.10.10. Формат 70×100 $^{1}/_{16}$. Гарнитура Times New Roman.
Бумага офсетная. Печать офсетная. Уч.-изд. л. 10,4. Усл. печ. л. 17,2. Тираж 500 экз. Заказ № 60/10.
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