

## КЛИМАТИЧЕСКАЯ ИЗМЕНЧИВОСТЬ ЛЕДОВОГО РЕЖИМА РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА ПО ДАННЫМ СВЧ-РАДИОМЕТРА, ОРИЕНТИРОВАННОГО В НАДИР

*П.В. Ключев<sup>1,2</sup>, С.А. Лебедев<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup> Тверской государственный университет, pasha.kliuev2015@yandex.ru

<sup>2</sup> Геофизический центр РАН

<sup>3</sup> Майкопский государственный технологический университет

Представлены результаты расчетов климатической изменчивости ледового режима Рыбинского водохранилища по данным СВЧ-радиометра, ориентированного в надир и находящегося на борту спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2/3, проводящих альтиметрические измерения. Анализ разности максимальной и минимальной радиояркостной температуры по трем частотам вдоль 59-го и 66-го треков для каждого цикла показал следующие климатические изменения ледового режима водоема за 1992—2017 гг. Ледостав наступает позднее и дата его начала смещается со скоростью  $0,886 \pm 0,181$  сут/год, а время начала вскрытия — со скоростью  $-0,206 \pm 0,046$  сут/год. Продолжительность ледостава сокращается за исследуемый интервал времени со скоростью  $-1,095 \pm 0,189$  сут/год.

*Ключевые слова:* Рыбинское водохранилище, ледовый режим, климатическая изменчивость, дистанционное зондирование, спутниковая радиометрия.

## CLIMATIC VARIABILITY OF THE RYBINSK RESERVOIR ICE REGIME BASED ON THE NADIR-ORIENTED MICROWAVE RADIOMETER

*P.V. Klyuev<sup>1,2</sup>, S.A. Lebedev<sup>2,3</sup>*

<sup>1</sup> Tver State University

<sup>2</sup> Geophysical Center RAS

<sup>3</sup> Maykop State Technological University

The paper presents the results of calculations of the climatic variability of the Rybinsk reservoir ice regime based on nadir-oriented microwave radiometers data of satellite TOPEX/Poseidon and Jason-1/2/3 satellites performing altimetry measurements. Analysis of the difference between the maximum and minimum brightness temperatures at three frequencies along 59 and 66 tracks for each cycle showed the following climatic changes of the reservoir ice regime for 1992—2017. Freeze-up occurs later and its start date is shifted at a rate  $0.886 \pm 0.181$  days/year, and the time of the opening of the autopsy is shifted at a rate  $-0.206 \pm 0.046$  days/year. The duration of ice formation is reduced over the studied time interval at a rate  $-1.095 \pm 0.189$  days/year.

*Keywords:* Rybinsk Reservoir, ice regime, climate variability, remote sensing, satellite radiometry.

### Введение

Лед на озерах и водохранилищах является частью криосферы Земли, которую затрагивают климатические изменения. Одновременно с изменением площади

льда в Арктике [4] происходят изменения ледового режима озер и водохранилищ [2, 3, 13].

Уникальную возможность исследования климатических изменений льдов Арктики и Антарктики, ледового режима на крупных озерах и реках дают данные дистанционного зондирования Земли [2, 5, 7, 10, 17, 18, 21, 24, 25]: радиометрия в видимом, инфракрасном и СВЧ (микроволновом) диапазонах; радиолокация с синтезированной апертурой; скаттерометрия; спутниковая альтиметрия. Преимущества и недостатки изучения льда различными методами дистанционного зондирования Земли представлены в табл. 1.

Таблица 1

Преимущества различных методов дистанционного зондирования Земли при изучении льда		
Прибор	Преимущества	Недостатки
<i>Пассивные методы зондирования</i>		
Радиометр видимого диапазона	Высокое пространственное разрешение	Чувствительность к облачному покрову и времени суток Низкая частота повторного обзора
Радиометр инфракрасного диапазона	Хорошее пространственное разрешение Высокая частота повторного обзора	Чувствительность к облачному покрову
Радиометр микроволнового диапазона	Всепогодность Высокая частота повторного обзора	Низкое пространственное разрешение
<i>Активные методы зондирования</i>		
Радар с синтезированной апертурой	Всепогодность Высокое пространственное разрешение	Низкая частота повторного обзора
Скаттерометр	Всепогодность Высокая частота повторного обзора	Низкое пространственное разрешение
Альтиметр	Всепогодность	Измерения в надир вдоль треков Низкая частота повторного обзора

По сравнению с 50-ми и 70-ми годами прошлого века, когда активно проводилась авиаразведка ледовой обстановки Рыбинского водохранилища, исследованием ледового режима водоема в настоящее время почти не занимаются.

При Рыбинской гидрометеорологической обсерватории (ныне метеостанции Рыбинск Ярославской ЦГМС) с конца XIX до начала XX века полевой сбор информации (на постах и рейдовых вертикалях, ледово-термических разрезах и съемках) считался одним из основных методов получения информации о ледовом режиме, а с 1947 до 1972 г. применялась авиационная разведка, с помощью которой было выявлены два типа замерзания водоема, зависящих от условий погоды (штиль/ветренная погода) [9, 11, 14]. В последнее время исследование ледовой обстановки Рыбинского водохранилища стало проводиться по данным

дистанционного зондирования Земли в видимом, инфракрасном и микроволновом диапазонах [19]. Целью настоящей работы является исследование ледового режима Рыбинского водохранилища с помощью такого метода дистанционного зондирования, как СВЧ-радиометрии с ориентированием в надир.

### Объект исследования

Рыбинское водохранилище, сооруженное в 1947 г., представляет собой один из больших искусственных водоемов в России [20, 22]. Во время его наполнения плотины гидроузла перекрыли реки Волгу и Шексню. Рыбинское водохранилище, образованное Рыбинской ГЭС, расположено на расстоянии 767 км от истока реки Волги у г. Рыбинска. Волжский сток, направленный в Рыбинское водохранилище, определяется лежащими выше по течению Верхневолжским, Ивановским и Угличским водохранилищами, а также Вазуским водохранилищем, расположенным на реке Вазузе. Шекснинское водохранилище, располагающееся выше, зарегулировало сток реки Шексны [8, 15].

Основные характеристики Рыбинского водохранилища приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры Рыбинского водохранилища [1, 6]

Параметр	Значение
Нормативный подпорный уровень (НПУ)	101,81 м
Минимально допустимый уровень (мертвого объема, УМО)	96,91 м
Максимально допустимый форсированный подпорный уровень (ФПУ) при пропуске максимальных расходовобеспеченностью 0,01 %	103,81 м
Минимальный навигационный уровень (МНУ)	99,31 м
Площадь зеркала при НПУ	4550 км <sup>2</sup>
Площадь зеркала при УМО	2385 км <sup>2</sup>
Объем водохранилища при НПУ	
– полный	25420 млн м <sup>3</sup>
– полезный	16670 млн м <sup>3</sup>
Объем водохранилища при проектном ФПУ	35420 млн м <sup>3</sup>
Площадь мелководий глубиной до 2 м	910 км <sup>2</sup>
Наибольшая глубина	30,4 м
Средняя глубина	5,6 м

На Рыбинском водохранилище, как и в природных водоемах этой климатической зоны, осенью происходит образование первичных форм ледовых образований. Формирование ледяного покрова на водохранилище происходит обычно позднее, чем на реках, что обусловлено размером водохранилища, скоростью течений и ветра и тепловым режимом в нем [11].

Разные части Рыбинского водохранилища сковываются льдом несинхронно. Водоем покрывается льдом вначале в заливах и бухтах на мелководьях, а затем ледяной покров появляется на реке и в центральных плесах водоема. Более глубокие участки покрываются льдом позже, чем реки этой климатической зоны, на 6—8 дней.

На обширных пространствах водохранилища перед образованием сплошного ледяного покрова в избытке образуются сало, внутриводный лед, шуга, льдины. Под воздействием ветра лед начинает прибывать к наветренному берегу. По этой причине у наветренного берега ледяной покров формируется в первую очередь и характеристики его иные (поверхность торосистая, под льдом накапливается шуга) по сравнению со льдом у подветренного берега (поверхность льда ровная). Во время ледостава могут возникать промоины. Их появление можно обнаружить на узких участках искусственных водоемов по причине увеличения скорости течения и турбулентного перемешивания водных масс, тепла которых, накопленного в летний период, достаточно для таяния льда снизу. Полыньи зачастую расположены в зоне влияния водоприемников ГЭС, где скорость течения велика: воздействие Рыбинской ГЭС можно отследить на расстоянии 15 км от гидроузла [12].

Отличительной чертой ледового режима Рыбинского водохранилища, как и некоторых других водоемов, представляется просадка ледяного покрова на дно мелководий. Данное явление объясняется постепенным снижением уровня воды зимой. Ледяной покров деформируется, возникают трещины, в некоторых местах вода сочится на поверхность и формируется наслуз (наледь). Площадь ледяных полей, просевших до дна, зачастую может составлять десятки и даже сотни квадратных километров.

В разных частях Рыбинского водохранилища разрушение ледяного покрова и его очищение развиваются по-разному. В верхних частях водоема во вскрытии большая роль отводится динамическим факторам. Ближе к плотине влияние динамических факторов уменьшается. Обычного для рек ледохода здесь не бывает, но наблюдается дрейф льда, обусловленный влиянием ветра и в какой-то мере течений.

Очищение Рыбинского водохранилища от льда происходит на 20 дней позже, чем очищение водотоков этой климатической зоны. Типичные явления при вскрытии — образование заторов льда на участках выклинивания подпора и скопление льда у наветренных берегов и на отмелях подчас мощностью до 4 м. На ледовый режим в нижнем бьефе Рыбинского водохранилища влияет количество сбрасываемой воды в Угличском гидроузле и ее температура. Близ него вода сковывается льдом на короткое время или не сковывается вовсе. Лед образуется на протяжении порой нескольких десятков километров ниже гидроузла. Расположение границы ледяного покрова изменчиво: во время холодов и при уменьшении попусков воды из водохранилища она подходит к плотине гидроузла, во время оттепели и при увеличении попусков отходит от нее [11]. Начало ледовых явлений на водотоках бассейна Верхней Волги чаще всего приходится на начало ноября, и продолжают они в среднем 150—160 суток. Средние даты образования сплошного ледяного покрова и очищения от льда — 10 ноября и 20 апреля соответственно [1, 9, 20].

### Данные и метод

Изучение ледового режима Рыбинского водохранилища проводилось по данным микроволновых радиометров, ориентированных в надиры, спутников TOPEX/Poseidon (T/P) и Jason-1/2/3 (J-1/2/3). Радиометр спутника T/P имеет рабочие

частоты 18, 21 и 34 ГГц (пространственное разрешение 43, 36 и 23 км соответственно) и спутников J-1/2/3 — частоты 18,7; 23,8 и 34,0 ГГц (пространственное разрешение 42, 36 и 23 км соответственно) [16]. По времени отбирались данные для следующих орбитальных циклов:

- Т/Р: фаза А, цикл с 1-го по 364-й (с 25 сентября 1992 г. по 3 августа 2002 г.);
- J-1: фаза А, цикл с 1-го по 260-й (с 17 января 2002 г. по 18 января 2009 г.);
- J-2: фаза А, цикл с 0-го по 303-й (с 14 июля 2008 г. по 24 сентября 2016 г.);
- J-3: фаза А, цикл с 0-го по 117-й (с 19 февраля 2016 г. по 16 сентября 2017 г.).

Два трека — 59-й (восходящий) и 66-й (нисходящий) — спутников Т/Р и J-1/2/3 пересекают центральную часть Рыбинского водохранилища, где ледяной покров присутствует каждую зиму (рис. 1). Измерения вдоль треков повторяются

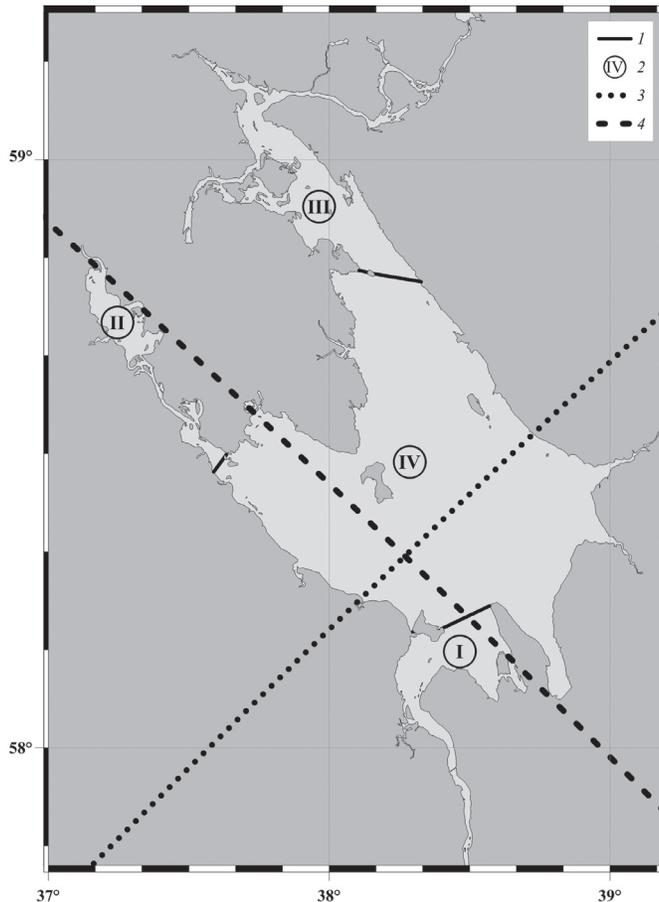


Рис. 1. Схема Рыбинского водохранилища [16].

*I* — граница между плесами; *2* — плесы: волжский (*I*), моложский (*II*), шекснинский (*III*), главный (*IV*); *3* — трек 59 спутников Т/Р & J1 & J2 & J3; *4* — трек 66 спутников Т/Р & J1 & J2 & J3.

каждые 10 сут. Измерения радиометром производятся с периодичностью 1 с. В случае водных объектов большой ширины вдоль трека спутника, каким является Рыбинское водохранилище (см. рис. 1), это позволяет идентифицировать наличие ледового покрова по радиояркостной температуре, измеренной на частоте 18—18,7; 21—23,8 и 34—37 ГГц [23]. Преимущества использования СВЧ-радиометров для мониторинга ледовой поверхности различных водоемов обуславливает тот факт, что диэлектрическая постоянная и излучательная способность в надир для чистой воды и для чистого льда различаются более чем в два раза (табл. 3).

Таблица 3

Характеристики  
разных типов засвеченных в надир поверхностей

Тип засвеченной поверхности	Диэлектрическая постоянная		Излучательная способность в надир	
	18,7 ГГц	34 ГГц	18,7 ГГц	34 ГГц
Чистая вода	60+35 <i>i</i>	20+33 <i>i</i>	0,37	0,43
Чистый лед	3,1+0,001 <i>i</i>	3,1+0,001 <i>i</i>	0,92	0,92

Метод анализа данных, полученных с помощью микроволнового радиометра, основан на определении и изучении разности значений максимальной и минимальной радиояркостной температуры, измеренных вдоль трека для каждого цикла на каждой из трех частот. Длина трека выбиралась таким образом, чтобы засвеченные области попадали и на сушу. За счет большой частоты измерений радиометром происходит перекрытие засвеченных областей, и при этом засвеченная область попадет как на акваторию водохранилища, так и на сушу (рис. 2). В итоге получается сглаженная область, которая свидетельствует об изменчивости радиояркостной температуры вдоль трека.

На рис. 3 приведены примеры кривых изменчивости радиояркостной температуры вдоль 59-го трека спутника J-3 за 19 июля и 19 февраля 2017 г. Из рисунка видно, что разность значений минимальной и максимальной радиояркостной температуры является наибольшей при отсутствии ледового покрова, а наименьшей при его наличии. Это связано с тем, что радиояркостная температура суши всегда выше радиояркостной температуры водной глади. Однако стоит отметить, что разность значений максимальной и минимальной радиояркостной температуры вдоль трека зимой меньше, чем летом.

Для дальнейшей обработки данных о временной изменчивости разности максимальной ( $T_{я\max}$ ) и минимальной ( $T_{я\min}$ ) значений радиояркостной температуры для каждого трека и для каждой частоты нормировались  $((T_{я} - T_{я\min}) / (T_{я\max} - T_{я\min}))$  для унификации программного обеспечения.

Примеры кривых изменения нормированной разности максимальной радиояркостной температуры для суши и минимальной радиояркостной температуры для зеркала Рыбинского водохранилища по частотам 18,7; 21; 34 ГГц за 2004 г. (с 1 января по 23 декабря) вдоль 66-го трека спутника J-1 во времени приведены

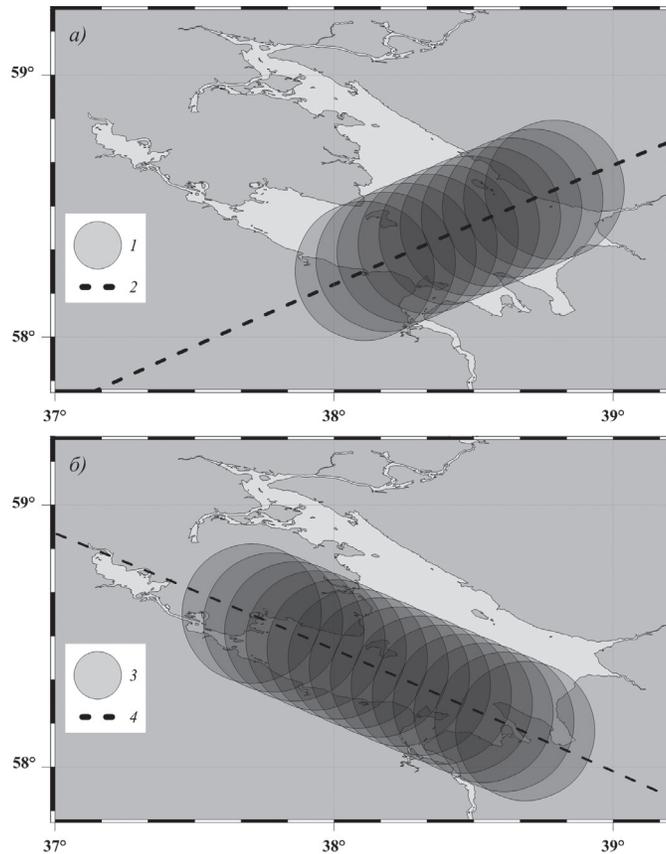


Рис. 2. Засвеченные области и сформированная сглаженная область в границах зеркала Рыбинского водохранилища на частоте 18,7 ГГц.

*a* — засвеченные области (1), расположенные на 59-м треке (2);  
*б* — засвеченные области (3), расположенные на 66-м треке (4).

на рис. 4. Кроме того, показана граница, отделяющая период наличия ледяного покрова на зеркале Рыбинского водохранилища от периода его отсутствия.

### Валидация метода

Применимость предложенного метода можно оценить, используя независимые *in situ* данные наблюдений за речным ледяным покровом из Информационной системы по водным ресурсам и водному хозяйству бассейнов рек России Центра регистра и кадастра [<http://gis.vodinfo.ru>]. Анализ спутниковых данных и данных наблюдений показал достаточно высокую их корреляцию: среднее значение по трем сравниваемым показателям (начало, окончание и продолжительность ледостава) составляет 0,84, что свидетельствует о близости результатов спутниковых

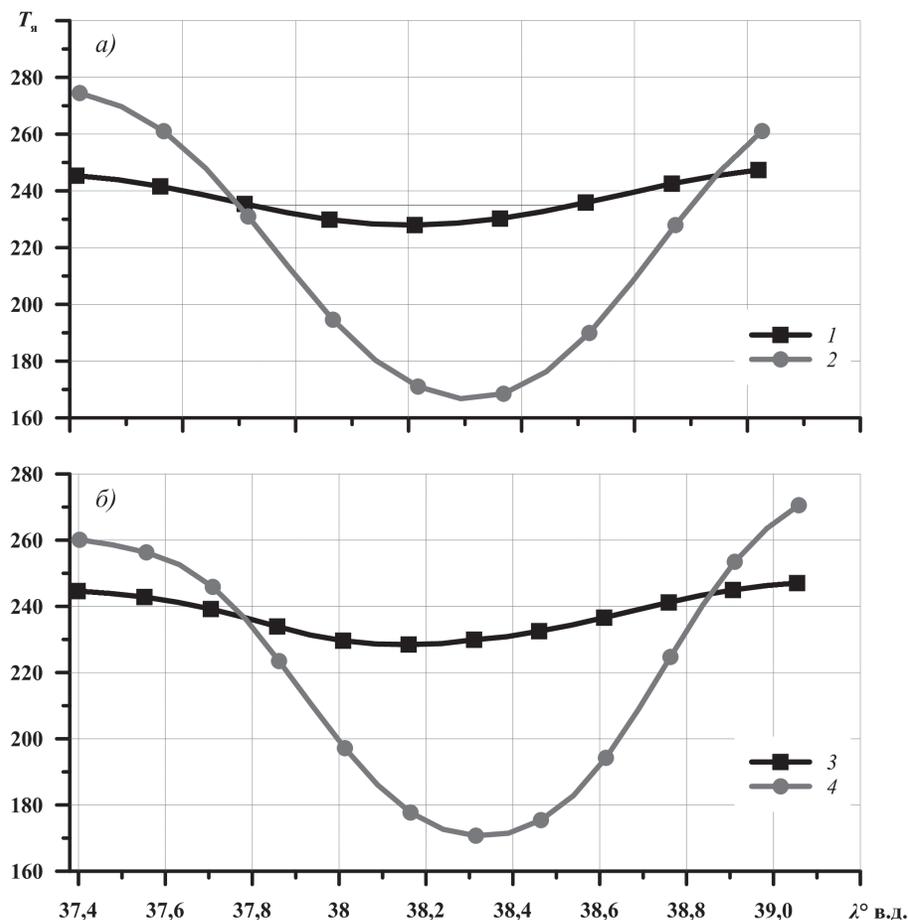


Рис. 3. Кривые изменения радиояростной температуры ( $T_r$ ) на частоте 18,7 ГГц спутника J-3.

*a* — вдоль 59-го трека за 19 февраля 2017 г. (1) и 19 июля 2017 г. (2);  
*b* — вдоль 66-го трека за 19 февраля 2017 г. (3) и 19 июля 2017 г. (4).

и полевых измерений. Коэффициент детерминации 0,7 означает наличие тесной связи дистанционных и *in situ* данных о ледяном покрове Рыбинского водохранилища.

Валидация показывает, что предложенный метод обеспечивает достаточно надежные результаты для определения времени замерзания, таяния и продолжительности ледостава на акватории Рыбинского водохранилища. Путем осреднения результатов, полученных на трех частотах, были определены характеристики ледовых условий в данном водоеме (начало, конец и продолжительность ледостава). Анализ временных рядов показывает выраженную межгодовую изменчивость.

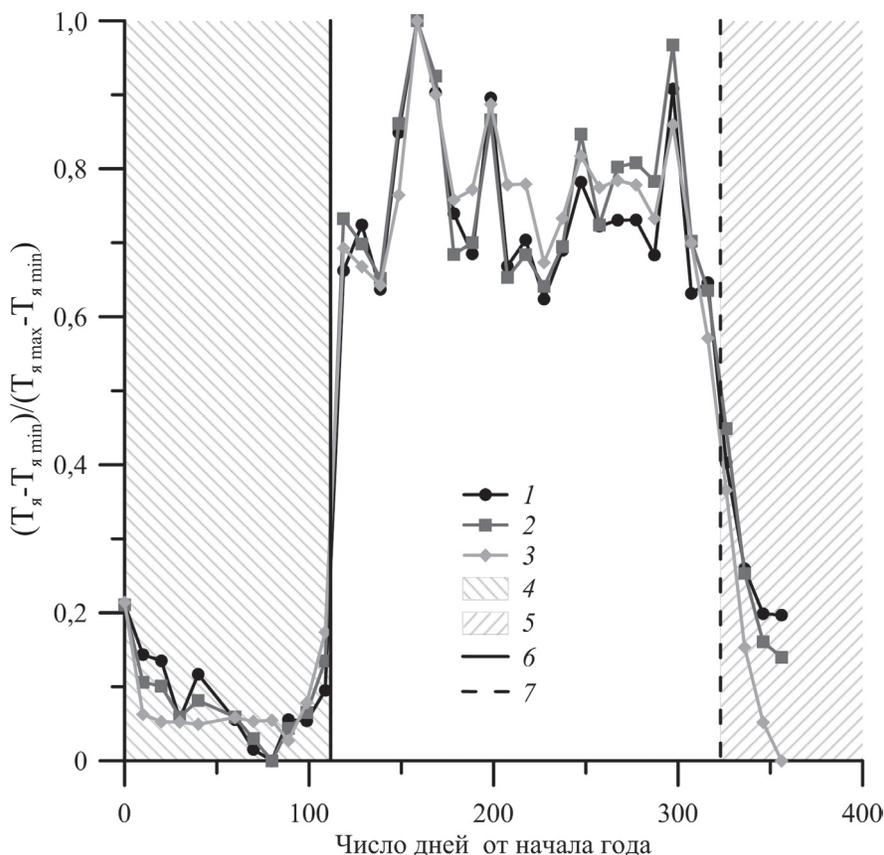


Рис. 4. Кривые изменения в течение года нормированной разности значений максимальной ( $T_{я\ max}$ ) и минимальной ( $T_{я\ min}$ ) радиояростной температуры  $(T_{я\ max} - T_{я\ min}) / (T_{я\ max} - T_{я\ min})$  для зеркала Рыбинского водохранилища за период с 1 января по 23 декабря 2004 г. по 66-му треку спутника J-1.

1 — на частоте 18,7 ГГц, 2 — на частоте 21 ГГц, 3 — на частоте 34 ГГц, 4 — ледяной покров в начале года, 5 — ледяной покров в конце года, 6 — граница лед — вода, 7 — граница вода — лед.

## Результаты

На рис. 5 представлена климатическая изменчивость дат начала ледостава и вскрытия ледяного покрова, а также продолжительности ледостава на акватории Рыбинского водохранилища за 1992—2017 гг. по данным альтиметра и бортового радиометра спутников TOPEX/Poseidon и Jason-1/2/3. Дата начала ледостава сдвигается со скоростью  $0,886 \pm 0,181$  сут/год, а дата вскрытия — со скоростью  $-0,206 \pm 0,046$  сут/год. Продолжительность устойчивого состояния ледяного покрова за исследуемый интервал времени уменьшается со скоростью  $-1,095 \pm 0,189$  сут/год.

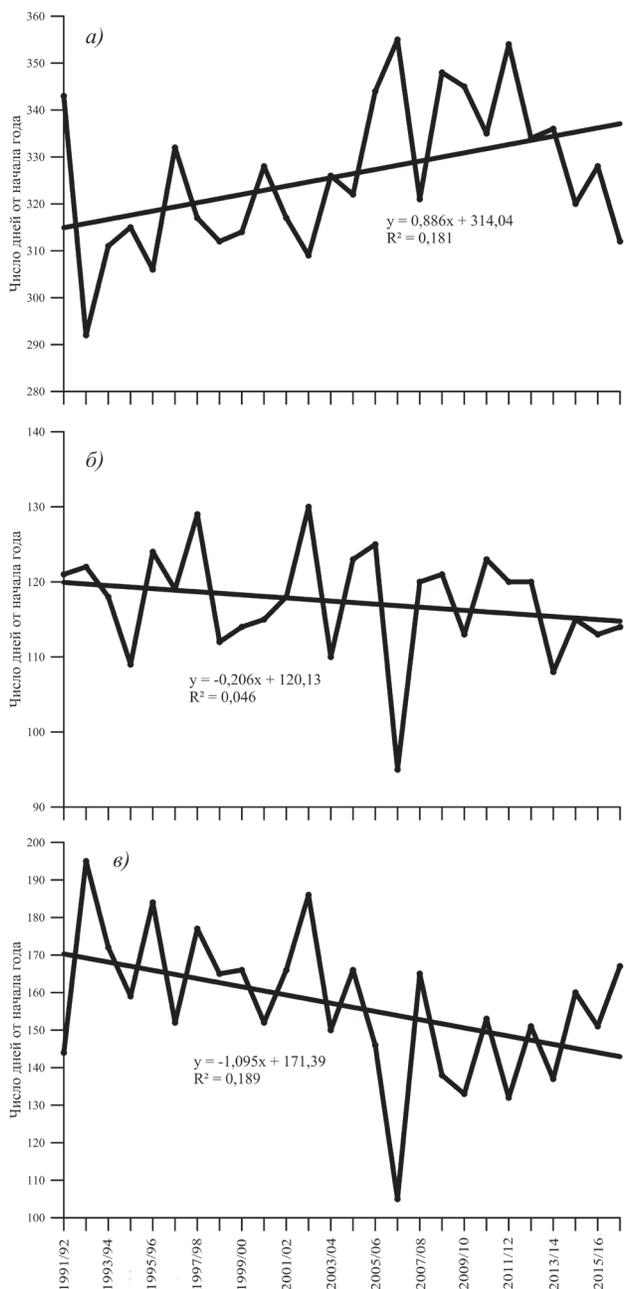


Рис. 5. Климатическая изменчивость времени начала ледостава (а), конца ледостава (б) и продолжительности ледостава (в) на акватории Рыбинского водохранилища за 1992—2017 гг., полученная в результате анализа данных бортового радиометра спутников Т/Р и J-1/2/3.

## Заключение

Предложен простой метод определения времени замерзания и вскрытия внутренних водоемов, основанный на анализе разности максимальной и минимальной радиояркостной температуры, измеренных микроволновым радиометром вдоль трека для каждого цикла. Показана климатическая изменчивость времени начала, окончания и продолжительности устойчивого состояния ледяного покрова на акватории Рыбинского водохранилища за период с 1992 по 2017 г.

*Работа выполнена в рамках Государственного задания ГЦ РАН, утвержденного Минобрнауки России (тема № 0145-2019-0004) (подготовка данных) при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-05-41117\_РГО\_а «Оценка современного гидрологического состояния крупных озер и водохранилищ Восточно-Европейской равнины на основе численного моделирования и новых алгоритмов обработки данных спутникового микроволнового зондирования» (интерпретация и анализ полученных результатов).*

## Список литературы

1. Авакян А.Б., Салтанкин В.П., Шаранов В.А. Водохранилища. М.: Мысль, 1987. 325 с.
2. Баклагин В.Н. Критический анализ спутниковых данных о пространственном распределении льда на озерах // Успехи современного естествознания. 2019. № 2. С. 41—48.
3. Баклагин В.Н. Совершенствование метода дешифрирования космических снимков больших озер на классы «вода» — «лед» // Современные проблемы науки и образования. 2015. № 2, 3. С. 290.
4. Бобылев Л.П., Шалина Е.В., Йоханнессен О.М., Заболотских Е.В., Сандвен С., Бабина О.И. Изменение арктического ледяного покрова по данным спутникового пассивного микроволнового зондирования // Проблемы Арктики и Антарктики. 2008. Т. 78, № 1. С. 38—47.
5. Бордонский Г.С., Гурулев А.А. Особенности радиотеплового изучения ледяных покровов водоемов с различной степенью минерализации // Водные ресурсы. 2008. Т. 35, № 2. С. 210—215.
6. Васильев Ю.С., Масликов В.И., Шилин М.Б. Режим регулирования стока Рыбинского водохранилища как основной фактор формирования экологической ситуации в осушной зоне // Ученые записки РГГМУ. 2016. № 45. С. 28—42.
7. Воробьев А.Е., Очирова Д.В. Особенности космического мониторинга геоэкологического состояния территории разрабатываемых месторождений нефти и газа в Арктике // Север и рынок: формирование экономического порядка. 2017. № 1 (52). С. 177—184.
8. Воропаев Г.В., Авакян А.Б. Водохранилища и их воздействие на окружающую среду. М.: Наука, 1986. 367 с.
9. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Водохранилища Верхней Волги / Под ред. З.А. Видулиной, В.А. Знаменского. Л.: Гидрометеиздат, 1975. 291 с.
10. Горный В.И. Космические измерительные методы инфракрасного теплового диапазона при мониторинге потенциально опасных явлений и объектов / В сб.: Труды III Всерос. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из Космоса». Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Москва, 10–12 ноября 2003 г. М.: Полиграфсервис, 2004. С. 10—16.
11. Донченко Р.В. Ледовый режим рек СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1987. 248 с.
12. Давыдов Л.К., Дмитриева А.А., Конкина Н.Г. Общая гидрология. Л.: Гидрометеиздат, 1973. 464 с.
13. Каретников С.Г. Опыт создания схем замерзания и вскрытия Ладожского озера / В сб.: Научное обеспечение реализации «Водной стратегии Российской Федерации на период до 2020 г. Петро-заводск: изд-во Карельского НЦ РАН, 2015. Т. I. С. 433—439.

14. Клюев П.В. Лебедев С.А. Исследование ледового покрова Рыбинского водохранилища // Вестник ТвГУ. Серия «География и Геоэкология». 2018. № 3. С. 66—78.
15. Кудинов К.А. Природные ресурсы Молого-Шекснинской низины. Рыбинское водохранилище. Часть III. Вологда: Северо-Западное книжное изд-во, 1974. 255 с.
16. Лебедев С.А., Клюев П.В. Идентификация ледяного покрова Рыбинского водохранилища и исследование его межгодовой изменчивости по данным спутниковой альтиметрии и радиометрии // Вестник ТвГУ. Серия «География и Геоэкология». 2018. № 1. С. 20—36.
17. Лебедев С.А., Костяной А.Г. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. М.: Издательский центр «МОРЕ» Международного института океана, 2005. 366 с.
18. Леухин А.Н., Безродный В.И., Воронин А.А. Дистанционное зондирование Земли с помощью радиолокаторов с синтезированной апертурой антенны // Ученые записки Казанского университета. Серия «Физико-математические науки». 2018. Т. 160. Кн. 1. С. 25—41.
19. Рис У.Г. Основы дистанционного зондирования. М.: Техносфера, 2006. 336 с.
20. Рыбинское водохранилище и его жизнь. / Под ред. Б.С. Кузина, Б.К. Штегмана. Л.: Наука, 1972. 363 с.
21. Спутниковые методы определения характеристик ледяного покрова морей / Под ред. В.Г. Смирнова. СПб.: ААНИИ, 2011. 240 с.
22. Федоров М.П., Чусов А.Н., Шилин М.Б., Голубев Д.А., Масликов В.И., Шишкин А.И. Прикладная экология акваномов. СПб.: Политехнический университет, 2012. 255 с.
23. Rybushkina G., Troitskaya Y., Soustova I. Ice cover determination of the Volga and the Don River reservoirs on the base of Jason-2 satellite observations //2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium. IEEE, 2014. С. 149—152.
24. Satellite Altimetry and Earth Sciences. A Handbook of Techniques and Applications / Eds. L.L. Fu, A. Cazenave. San Diego: Academic Press, 2001. 464 p.
25. Satellite Altimetry for Earth Sciences / Eds. F. Frappart, O. Andersen, S. Lebedev, G. Ramillien. MDPI, 2019. 484 p.