

УДК 551.50+556+528.8

DOI: <https://doi.org/10.26456/2226-7719-2018-3-66-78>

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛЕДОВОГО ПОКРОВА РЫБИНСКОГО ВОДОХРАНИЛИЩА*

П.В. Ключев¹, С.А. Лебедев^{2,3}

¹ Тверской государственный университет, Тверь

² Геофизический центра РАН, Москва

³ Майкопский государственный технологический институт, Майкоп

В работе представлены результаты анализа процесса замерзания и вскрытия Рыбинского водохранилища в короткий период ледостава зимой 2013–2014 и длинного периода ледостава зимой 2016–2017 годов по данным метеостанций вокруг Рыбинского водохранилища и дистанционного зондирования – спектрорадиометра MODIS спутников Terra и Aqua.

Ключевые слова: *Рыбинское водохранилище, ледостав, типы ледообразования, схема ледообразования, данные метеостанций, данные дистанционного зондирования.*

Введение

По сравнению с водохранилищами бассейна Верхней Волги (Верхневолжское, Ивановское, Угличское, Шекснинское и Горьковское водохранилища) ледовый режим Рыбинского водохранилища наиболее детально исследован. Исследование ледового режима проводится как с помощью активных и пассивных методов дистанционного зондирования, авиационной разведки, так и посредством многолетних наблюдений в полевых условиях (на постах и рейдовых вертикалях, ледово-термические разрезы и съемки, специальные наблюдения за нарастанием и таянием льда и т.д.) при Рыбинской гидрометеорологической обсерватории, действующей под управлением Ярославской Центральной гидрометеорологической службы. Ледовый режим объекта исследования не постоянен и находится под действием изменения климатических факторов – температурного режима и атмосферной циркуляции (ветровой

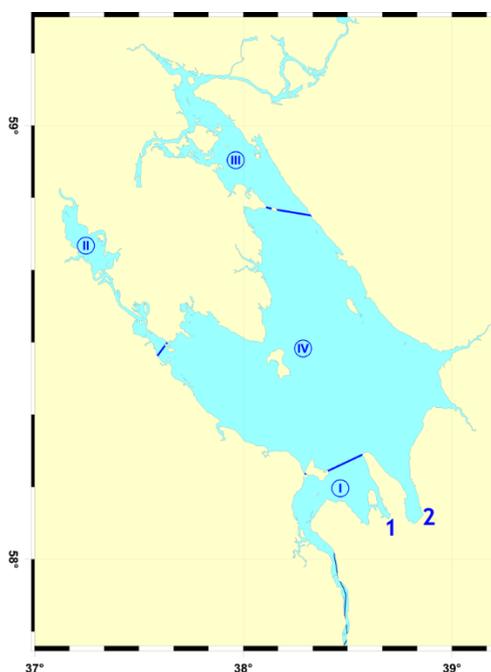
* Работа выполнена в рамках государственного задания ГЦ РАН, утвержденного ФАНО России (тема № 0145-2016-0005) (подготовка данных) при частичной финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 17-05-41117_РГО_a «Оценка современного гидрологического состояния крупных озер и водохранилищ Восточно-Европейской равнины на основе численного моделирования и новых алгоритмов обработки данных спутникового микроволнового зондирования» (интерпретация и анализ полученных результатов).

режим). Это проявляется в изменении времени начала, конца и продолжительности ледостава. На смену традиционным наблюдениям в настоящее время пришло дистанционное зондирование Земли из космоса, которое хорошо зарекомендовало себя при исследовании ледовой обстановки на акваториях Северного Ледовитого и Южного океанов, а также внутренних морей и крупных водных объектов.

Рыбинское водохранилище представляет из себя водоём озёровидной формы, которая определяется долинами рек Волги и Мологи, а также междуречьем Волги и Шексны. Данное водохранилище протянулось от Череповца до Рыбинска – в субмеридианальном направлении (с северо-запада на юго-восток). В своём строении Рыбинское водохранилище представляется четырьмя большими частями или плёсами: центральный, шекснинский, волжский и моложский (рис. 1).

Во время многолетних наблюдений (1947–1972) было замечено, что для Рыбинского водохранилища наиболее характерны два типа начала ледостава. Согласно первому типу ледообразования, становление ледостава на озёрах и водохранилищах будет происходить при следующих благоприятных условиях:

- тихая погода;
- участки рек с малой скоростью течения;
- условие, при котором не наблюдается ветровое волнение;
- переохлаждение воды в поверхностном слое при температуре воздуха ниже 0°C .



Р и с. 1. Схема строения Рыбинского водохранилища. Цифрами обозначены следующие плёсы: I – волжский, II – моложский, III – шекснинский, IV – центральный; 1 – Переборский залив, 2 – Шекснинская горловина

Можно также выделить следующие следствия, сопутствующие первому типу ледообразования:

- возникновение первичных иглообразных кристаллов;
- образование тонкого начального льда;
- нарастание мощности ледового покрова вследствие кристаллизации воды с нижней поверхности льда.

Первый тип замерзания наблюдался на Рыбинском водохранилище в 1948, 1955–1957, 1965, 1969–1970 и 1972 гг. [1].

Согласно второму типу становления ледостава, ледовый покров образуется на озёрах и водохранилищах при следующих благоприятных условиях:

- ветреная погода;
- участки рек с быстрым течением;
- сильное турбулентное перемешивание;
- переохлаждение воды при температуре воздуха ниже 0°C.

Просматриваются следующие последствия, которые характерны для второго типа ледообразования. Внутриводный лёд в форме кристаллов, которые взвешены в водном потоке или примерзают к предметам, находящимся в воде или под водой, а также ко дну (донный лёд). Образование шуги – скопления внутриводного льда при увеличении его концентрации. Увеличение мощности льда вследствие подныривания внутриводного льда под кромку ледового покрова и его откладывание под нижней поверхностью льда.

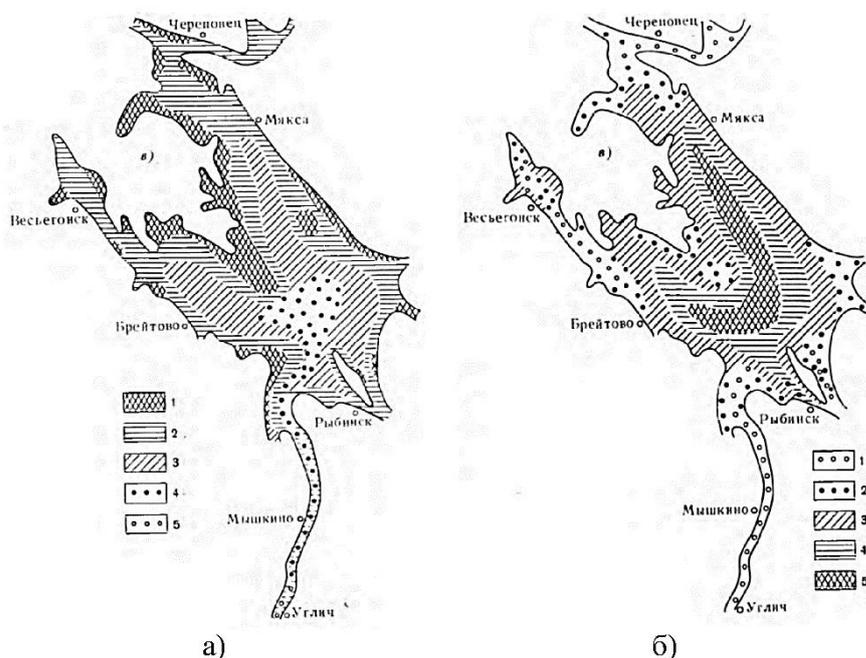
Таяние льда на водоёме обычно начинается с разрушения снега на ледовом покрове, по обыкновению, как на озёрах и водохранилищах. Чем больше проникает солнечной радиации в лёд, тем больше скорость его разрушения. После того, как снег полностью разрушится, солнечная радиация всё больше проникает через весь лёд и это уже влияет на прогрев воды, а вследствие и на таяние ледовой поверхности внизу. Затем появляются крупные и небольшие промоины, а сама ледовый покров начинает приобретать столбчатое строение. В конце на темпы таяния льда также начинают оказывать большое влияние действие ветра, а также увеличение уровня водохранилища с уровня мёртвого объёма (96.91 м) до нормального подпорного уровня (101.81 м). Естественно, что уровень мертвого объёма (характерно для зимней межени) меньше, чем нормальный подпорный уровень.

Разрушение ледового покрова на Рыбинском водохранилище, в начале, происходит на участках рек с образования небольших водных пространств между берегом и льдом водохранилища, проталин, промоин, трещин и просветов между движущимися ледяными полями, затем идёт разрушение льда в остальных частях водоёма [3]. Периоды очищения ото льда водохранилища весной имеют зависимость от того, насколько сурова зима, которая влияет на мощность ледового покрова, и даты

перехода температуры воздуха через 0°С к значениям больше нуля. Но помимо естественных факторов, оказывают влияние на разрушение льда и антропогенные факторы, а именно работа ледоколов и проходящих транзитом через водохранилище речных судов, а также при сбросах воды из водохранилища, лежащего выше по течению реки Волги (Угличского водохранилища).

Второй тип замерзания имел место в 1942–1947, 1949–1954, 1958–1964, 1966–1968 и 1971 гг. [1].

Появление льда на Рыбинском водохранилище происходит прежде всего в прибрежных районах моложского и шекснинского плесов и устьев небольших рек и ручьев в первой пятидневке ноября. Затем 8–10/XI лед появляется в центральном плесе и Переборском заливе и, наконец, во второй половине ноября в волжском плесе (рис. 2а). Более позднее замерзание волжского плеса объясняется значительными глубинами этого плеса (10–13 м), резкими изменениями сбросов через Угличскую ГЭС, а также поступлением более теплой



Р и с. 2. Карта-схема замерзания (а) и вскрытия (б) Рыбинского водохранилища (по материалам авиаразведки и наблюдений на постах с 1946 по 1969 гг.):

а – последовательность замерзания:

1 – 1–6/XI, 2 – 7–15/XI, 3 – 16–20/XI, 4 – 21–25/XI, 5 – позже 25/XI.

б – последовательность вскрытия и очищения ото льда:

1 – 15–20/IV, 2 – 21–25/IV, 3 – 26–30/IV, 4 – 1–5/V, 5 – позже 5/V

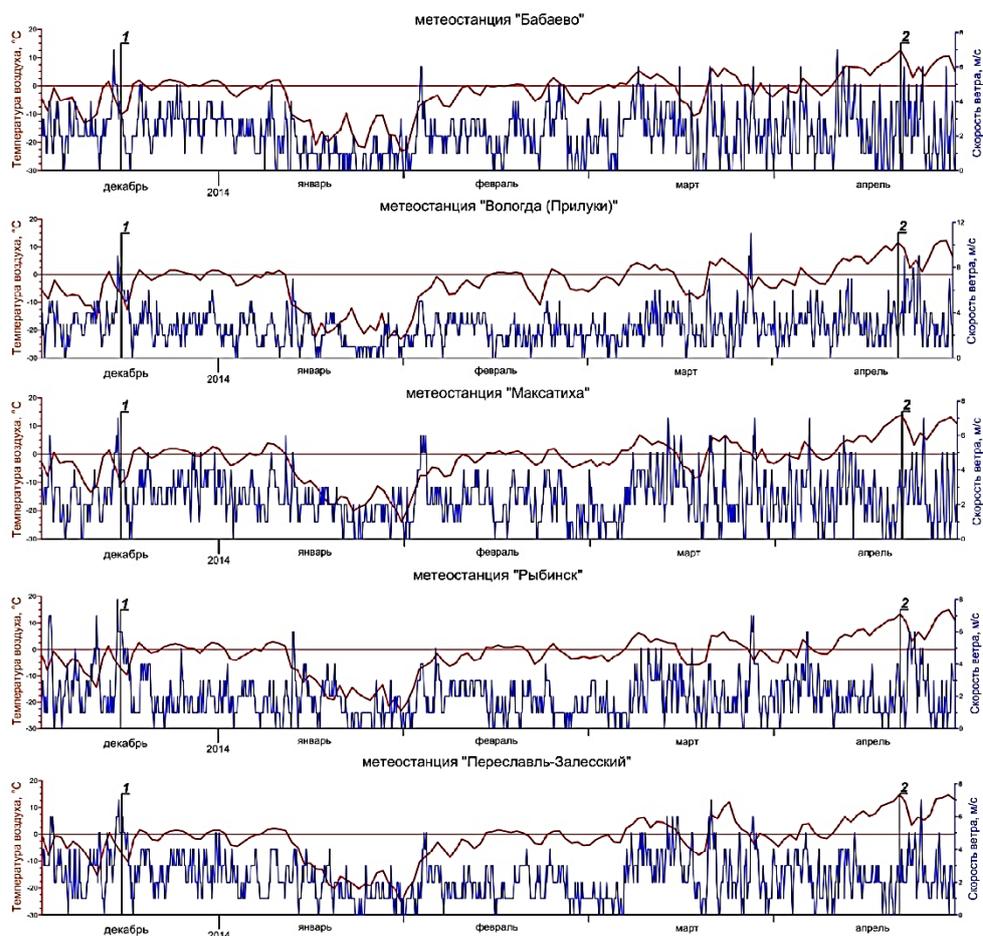
[1].

воды из Угличского водохранилища. Появление льда в прибрежных районах ежегодно отмечается непосредственно после перехода температуры воздуха к отрицательным значениям.

В нижнем бьефе Угличской ГЭС полынья простирается обычно на 0.7–0.8 км. При оттепелях и в периоды работы гидроэлектростанции на полную мощность протяженность ее увеличивается до 4 км.

В шекснинской горловине Рыбинского водохранилища размеры полыньи в зимний период малы. Весной она увеличивается, занимая иногда всю горловину.

Вскрытие на речных участках происходит обычно во второй половине апреля и начинается с образования закраин, промоин, появления полыней, трещин и разводий. В конце апреля начинается вскрытие остальных районов.



Р и с. 3. Метеорологические данные с метеостанций, расположенных близ Рыбинского водохранилища для периода декабрь 2013 г. – май 2014 г.: 1 – начало ледостава, 2 – конец ледостава.

Очищение ото льда речных зон происходит в конце апреля, через 8–10 дней в мае очищаются остальные районы водохранилища (рис. 2б).

Сроки ледовых явлений весной зависят от суровости зимы (которая определяет толщину льда) и времени перехода среднесуточной температуры воздуха через нуль к положительным значениям. При теплой весне период от вскрытия до очищения сокращается. Если весной наблюдаются возвраты холода, процесс очищения растягивается на 15–20 дней (1949, 1954, 1956, 1958 гг.).

На разрушение ледяного покрова в некоторой степени оказывают влияние факторы, связанные с эксплуатацией водохранилища. Так, на волжском плесе более интенсивное разрушение льда наблюдается при максимальных сбросах воды из Угличского водохранилища (около 7000–8000 м³/с). В Переборском заливе и на судоходных трассах разрушению ледяного покрова способствует взламывание льда ледоколами.

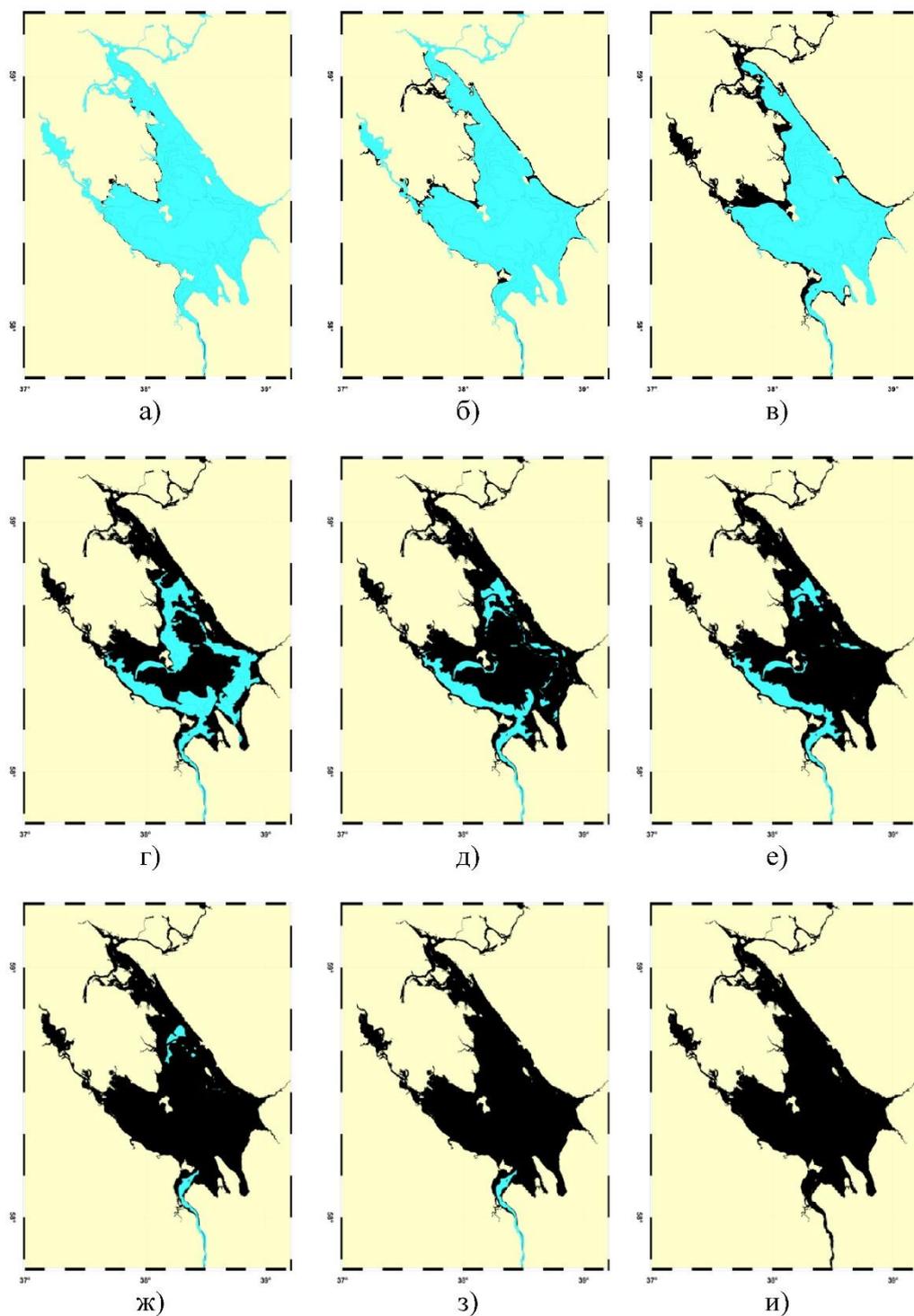
На волжском плесе весной наблюдается ледоход речного типа, сопровождающийся иногда заторами льда у п. Мышкино и с. Коприно. Ледоход наблюдается также на моложском плесе в районе г. Весьегонска. Сброс льда через плотину в Горьковское водохранилище не производится.

Ледовый режим Рыбинского водохранилища

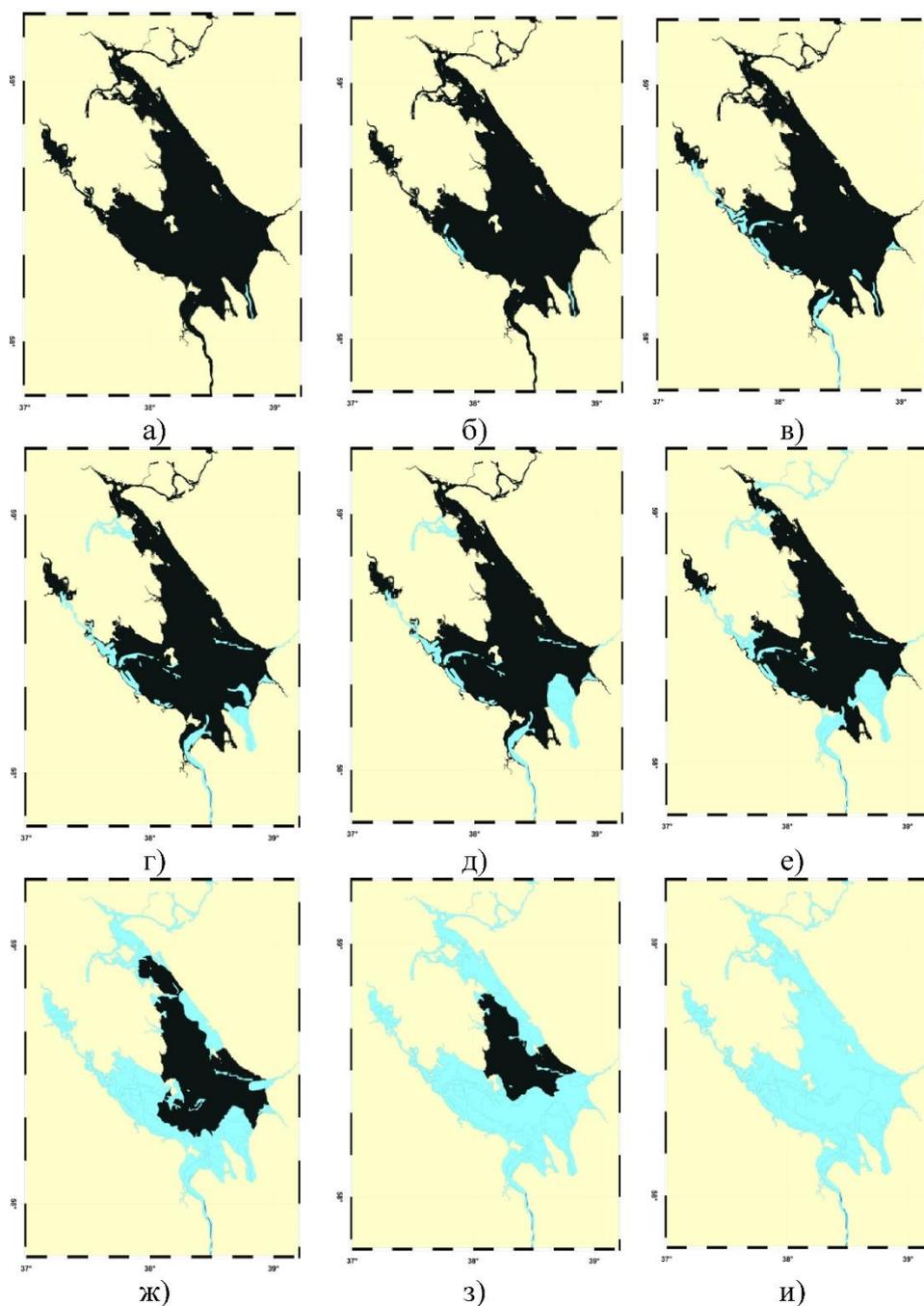
В данной работе для исследования типов ледообразования были взяты два периода: зима 2013–2014 (18 ноября – 24 апреля: 157 дней) и 2016–2017 (1 ноября – 1 мая: 181 день) годов, как один из самых коротких и продолжительных периодов ледостава соответственно [3].

Анализ ледообразования проводился по данным спектрометра MODIS спутников Terra и Aqua с пространственным разрешением 250 м. Для зимы 2013–2014 из 392 спутниковых изображений только 48 изображений были с облачностью менее 10%. Для зимы 2016–2017 из 392 спутниковых изображений только 32 изображения были с облачностью менее 10%. Анализ метеорологических условий начала замерзания и вскрытия водохранилища проводился по данным с метеостанций (Бабаево, Вологда, Максатиха, Рыбинск и Переславль-Залесский), расположенных вокруг Рыбинского водохранилища.

Первый рассматриваемый период замерзания зимы 2013–2014 характеризуется скоростью ветра 4–5 м/с и температурой воздуха в пределах от -5°C до -10°C (рис. 3). Данные условия характерны для второго типа ледообразования, т.к., согласно градации шкалы Бофорта, при слабом ветре (3.3–5.4 м/с) наблюдаются волны высотой до 0.9 м, что достаточно для турбулентного перемешивания и образования в водной толще внутриводного льда в виде кристаллов, а вследствие и шуги.



Р и с. 4. Процесс ледообразования в один из коротких периодов ледостава зимы 2013–2014 годов: а) – 18/XI, б) – 30/XI, в) – 1/XII, г) – 4/XII, д) – 9/XII, е) – 10/XII, ж) – 14/XII, з) – 15/XII, и) – 27/XII.

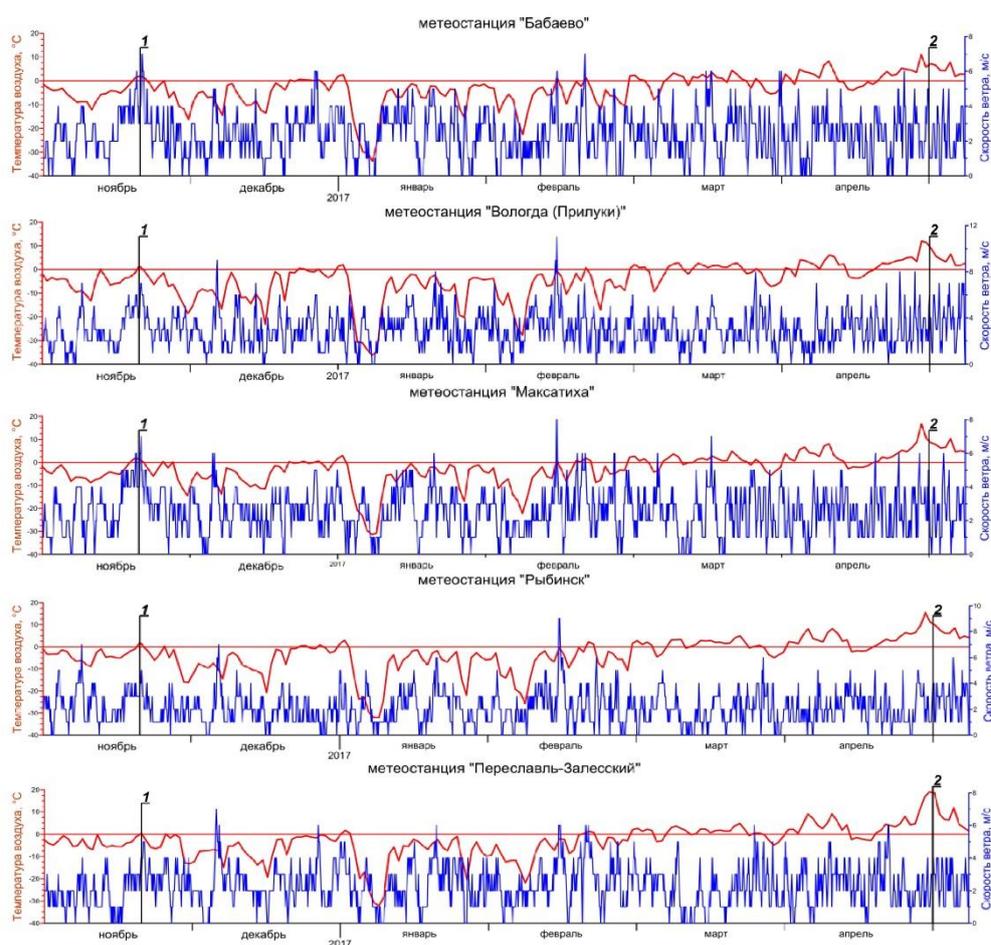


Р и с. 5. Процесс таяния ледяного покрова в один из коротких периодов ледостава зимы 2013–2014 годов:
а) – 24/II, б) – 26/II, в) – 9/III, г) – 29/III, д) – 1/IV,
е) – 15/IV, ж) – 21/IV, з) – 22/IV, и) – 24/IV.

Зимой 2013–2014 годов появление льда начиналось в прибрежных районах моложской и шекснинской части Рыбинского водохранилища и

местах впадения небольших водотоков (реки, ручьи) (рис. 4а–4в). После этого ледообразование охватывает центральную часть водохранилища (рис. 4г–4е). Процесс ледообразования заканчивается в Переборском заливе и волжской части водохранилища (рис. 4ж–4и). Рассматривая общую тенденцию замерзания водохранилища зимой 2013–2014 можно констатировать, что образование льда идёт с северо-востока на юго-запад водоёма.

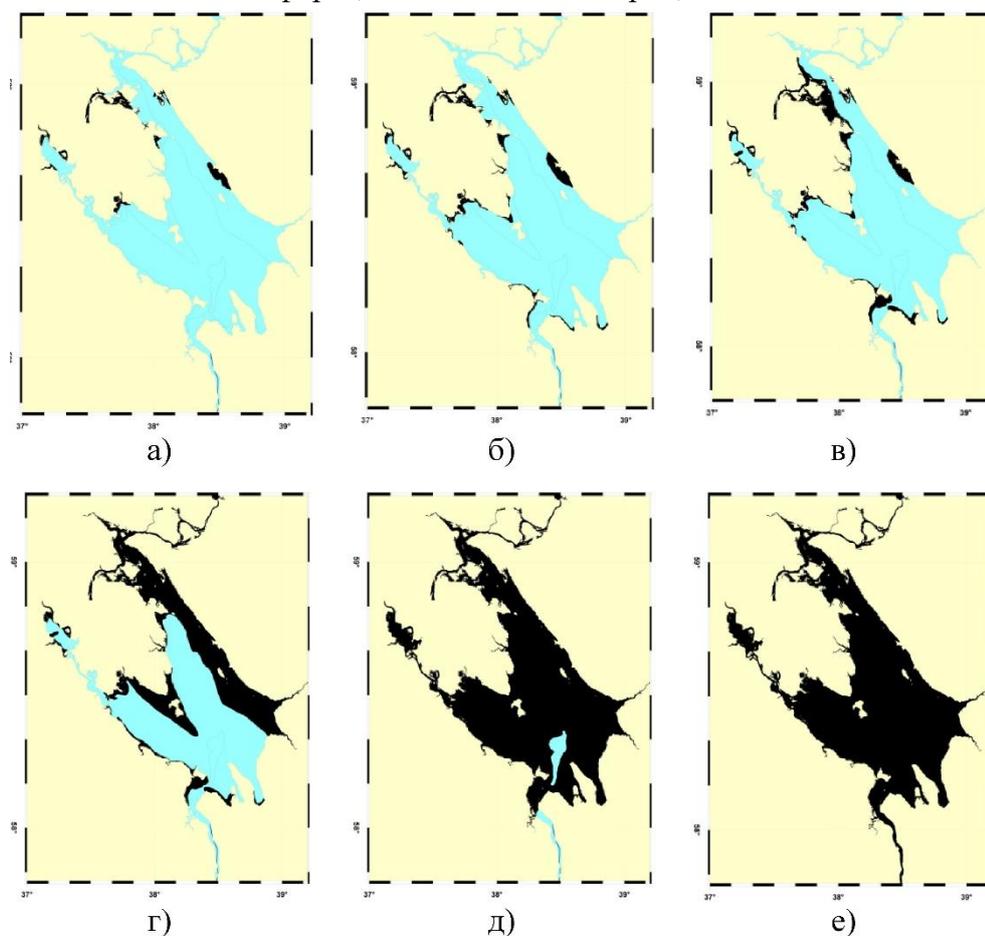
В период 2013–2014 годов таяние льда начинается в заливе, являющимся затопленным руслом реки Шексны (город Рыбинск) (рис. 5а–5б). Затем очищаются от льда волжская часть и Переборский залив (рис. 5в–5г), после этого моложская и шекнинская части (рис. 5д–5е), а в конце разрушение ледового покрова затрагивает центральную часть Рыбинского водохранилища (рис. 5ж–5и).



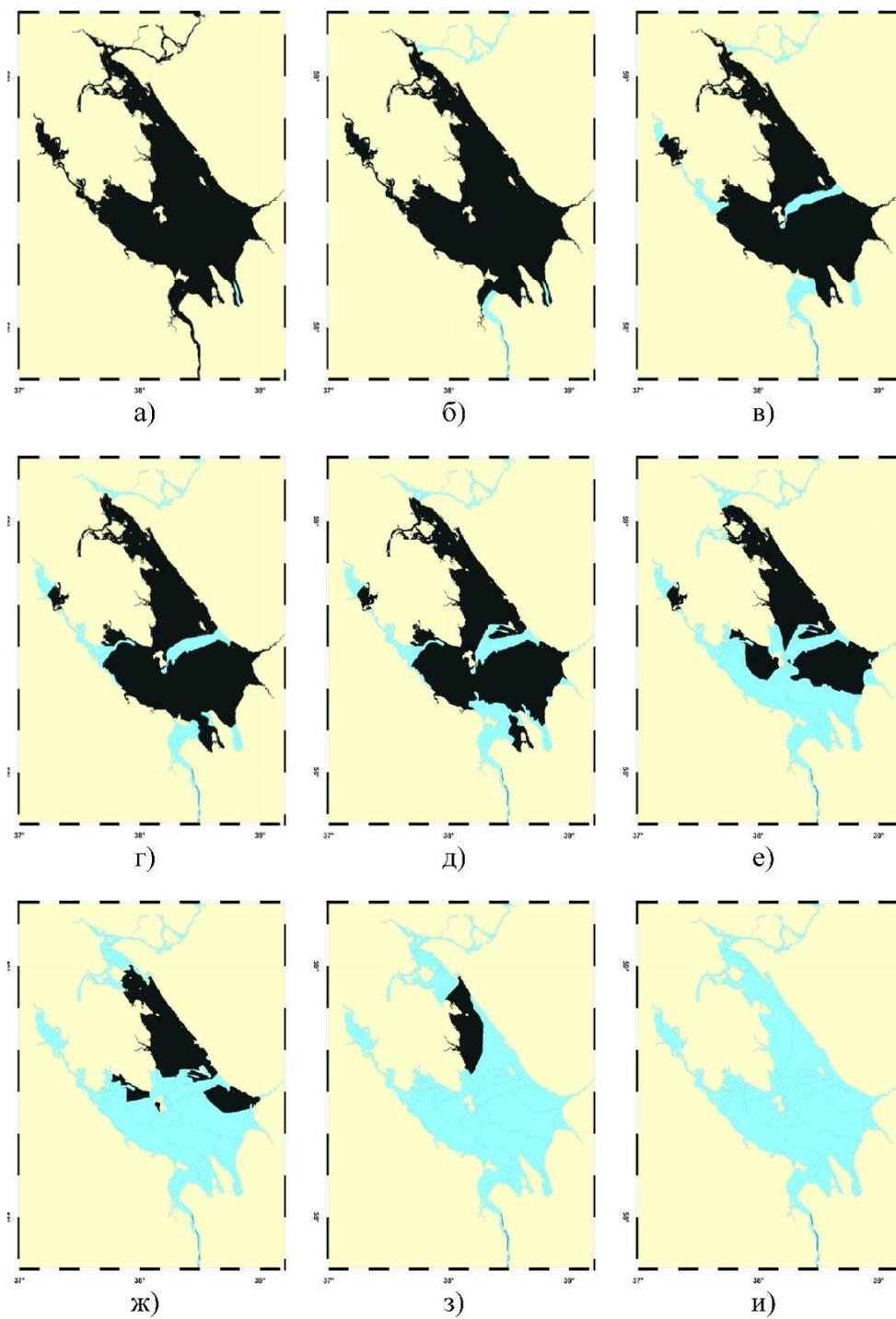
Р и с. 6. Метеорологические данные с метеостанций, расположенных близ Рыбинского водохранилища для периода ледостава 2016 – 2017 годов: 1 – начало ледостава, 2 – конец ледостава.

Рассматривая общую тенденцию можно заметить, что вскрытие водохранилища идёт от периферии к центру, но большое влияние в этом процессе оказывает река Волга, поэтому если судить по схеме, то последняя стадия чуть сдвинута от ядра центрального плёса Рыбинского водохранилища на север, ближе к шекнинскому плёсу.

Второй самый продолжительный период ледостава 2016–2017 годов за время исследования (2002–2017) характеризовался скоростью ветра 3–4 м/с и температурой воздуха от 0°C до +2°C (на протяжении 4–5 дней около точки начала ледостава) (рис. 6). Хотя на протяжении 15–17 суток наблюдались отрицательные температуры воздуха и относительно небольшая скорость ветра (волны на водной глади, согласно шкале Бофорта, достигали 0.3 метров, чего недостаточно для



Р и с. 7. Процесс ледообразования в самый продолжительный период ледостава зимы 2016–2017 годов: а) – 1/XI, б) – 2/XI, в) – 5/XI, г) – 6/XI, д) – 12/XI, е) – 20/XI.



Р и с. 8. Процесс таяния ледяного покрова в самом длинном периоде ледостава зимы 2016–2017 годы: а) – 28/II, б) – 9/IV, в) – 18/IV, г) – 20/IV, д) – 21/IV, е) – 25/IV, ж) – 28/IV, з) – 30/IV, и) – 1/V.

турбулентного перемешивания и образования внутриводного льда). Поэтому шло образование тонкого начального льда на поверхностном слое водной толщи. Таким образом, для периода ледостава за 2016–2017 года характерен первый тип лёдообразования.

Процесс образования ледового покрова в ноябре 2016 года начинался с прибрежных районов моложского и шекснинского плёсов (рис. 7а–7в), далее этот процесс охватывал центральный плёс (рис. 7г–7д), а закончилось лёдообразование волжской частью Рыбинского водохранилища (рис. 7е). При рассмотрении процесса образования льда, можно заметить некоторую закономерность – наползание льда идёт с северо-востока на юго-запад, как и для первого описываемого периода ледостава за 2013–2014 года.

Процесс вскрытия водохранилища весной 2017 года начинается с залива, являющимся затопленным руслом реки Шексны (рис. 8а). Следующим очищается ото льда волжский и моложский плёсы и русло реки Шексны до города Череповец (рис. 8б–8д). Затем лёд сходит в центральной части Рыбинского водохранилища и северо-западной части шекснинского плёса (рис. 8е–8ж). Заканчивается процесс очищения ото льда водоёма в районе стыка шекснинской и центральной части водохранилища (рис. 8з–8и). Рассмотрев процесс таяния ледового покрова, можно отметить, что разрушение льда шло с юго-запада на северо-восток до границы двух районов водохранилища (шекснинского и центрального).

Заключение

На основе рассмотренных метеорологических данных за 2002–2017 годы и идентификации ледового покрова на акватории Рыбинского водохранилища в работе [3] были выделены два периода по продолжительности ледостава, для которых характерны два типа лёдообразования. Короткий период ледостава характеризуется вторым типом, а наиболее продолжительный период – первым типом лёдообразования, при этом процесс образования льда осенью 2016 года был интенсивнее, чем осенью 2013 года. Что касается процесса разрушения льда, то у двух выделенных периодов относительно похожие тенденции – разрушение льда идёт с юго-запада на северо-восток до границы двух районов Рыбинского водохранилища – шекснинского и центрального плесов.

Список литературы

1. Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР. Водохранилища Верхней Волги. / Под ред. З.А. Викулиной, В.А. Знаменского. – Л.: Гидрометеиздат, 1975. – 291 с.

2. Донченко Р.В. Ледовый режим рек СССР. – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 248 с.
3. Лебедев С.А. Ключев 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.

INVESTIGATION OF THE ICE COVER OF THE RYBINSK RESERVOIR

P.V. Klyuyev¹, S.A. Lebedev^{2,3}

¹ Tver State University, Tver

² Geophysical Center, Russian Academy of Sciences, Moscow

³ Maykop State Technological University, Maykop

The paper presents the results of the analysis of the process of freezing and opening of the Rybinsk Reservoir in a short period of freezing in the winter of 2013-2014 and a long period of freezing in the winter of 2016-2017 according to the weather stations around the Rybinsk Reservoir and remote sensing - the MODIS spectrometer of the Terra and Aqua satellites.

Keywords: *Rybinsk reservoir, ice cover, ice formation types, ice formation scheme, weather station data, remote sensing data..*

Об авторах:

КЛЮЕВ Павел Валерьевич – студента 4 курса Тверского государственного университета по направлению 05.03.06 «Экология и природопользование», e-mail: pasha.kliuev2015@yandex.ru.

ЛЕБЕДЕВ Сергей Анатольевич – доктор физико-математических наук, ведущий научный сотрудник Геофизического центра РАН, заведующий Лабораторией геоэкологии, геоинформатики и рационального природопользования Майкопского государственного университета, почетный профессор Тверского государственного университета, e-mail: lebedev@wdcb.ru