

Корнеева Н.Ю.<sup>1</sup>, Измайлова А.В.<sup>2</sup>

## ИЗУЧЕНИЕ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ И ВРЕМЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ОЗЕРНОГО ВОДНОГО ПОКРЫТИЯ РЕГИОНОВ НЕДОСТАТОЧНОГО УВЛАЖНЕНИЯ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

### АННОТАЦИЯ

В рамках проведенных в Институте озераедения РАН работ по оценке водных ресурсов озер Российской Федерации получен массив данных, позволяющий разрабатывать подробную карту озерности Российской Федерации. Анализ показателя озерности территории является наиболее удобным для оценки пространственной неоднородности распределения озерных водных ресурсов. Для регионов, расположенных в пределах зоны водного дефицита, значения коэффициентов озерности в разные сезоны и в разные по водности годы могут отличаться от средних величин, полученных ранее авторами. Проведение анализа изменений озерного покрытия в таких регионах представляется возможным с использованием данных спутниковой съемки за различные сезоны года и периоды водности. Изучение динамики озерных ресурсов регионов недостаточного увлажнения было начато с использования спутниковых снимков Landsat 5 TM уровня обработки Level-1 среднего пространственного разрешения. Анализ сцен за разные периоды водности 2010 г. показал сокращение суммарной площади водного зеркала в пределах пяти тестовых участков, расположенных на юге Тюменской области, в период с мая по август на 20 %. Количество водоемов крупнее 10 га уменьшилось с 60 до 46. На основе рассчитанных величин озерности в периоды различной водности 2010 г. были построены карты-схемы озерного покрытия для территории пробного района. Полученные характеристики временной динамики водной поверхности, а также анализ построенных карт озерности позволяют проводить уточнения результатов оценки водных ресурсов озер Российской Федерации для регионов водного дефицита.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** водные ресурсы, озерность, спутниковый снимок, карта озерности, геоинформационные системы.

Natalya Yu. Korneenkova<sup>3</sup>, Anna V. Izmailova<sup>4</sup>

## SPATIAL AND TEMPORAL HETEROGENEITY OF WATER SURFACE AREA OF LAKES IN THE REGIONS OF INSUFFICIENT MOISTURE WITH USING THE SATELLITE IMAGES

### ABSTRACT

The significant data array has been obtained within the framework of the works carried out at the Institute of Limnology RAS for assessing the water resources of the lakes of the Russian Federation. This array makes it possible to develop a detailed map of lake percentage of the Russian Federation.

<sup>1</sup> ФГБУН Институт озераедения Российской академии наук, ул. Севастьянова, д. 9, 196105, Санкт-Петербург, Россия, *e-mail*: [ntkorn87@gmail.com](mailto:ntkorn87@gmail.com)

<sup>2</sup> ФГБУН Институт озераедения Российской академии наук, ул. Севастьянова, д. 9, 196105, Санкт-Петербург, Россия, *e-mail*: [ianna64@mail.ru](mailto:ianna64@mail.ru)

<sup>3</sup> Institute of Limnology Russian Academy of Sciences, Sevastyanova str., 9, 196105, Saint-Petersburg, Russia, *e-mail*: [ntkorn87@gmail.com](mailto:ntkorn87@gmail.com)

<sup>4</sup> Institute of Limnology Russian Academy of Sciences, Sevastyanova str., 9, 196105, Saint-Petersburg, Russia, *e-mail*: [ianna64@mail.ru](mailto:ianna64@mail.ru)

An analysis of the change in the lake percentage coefficient is the most convenient for estimating the spatial heterogeneity of the distribution of lake water resources. For regions located within the water deficit zone, the values of the lake percentage in different seasons and in different years may differ from the mean values obtained earlier by the authors. Analysis of changes in lake coverage in such regions is possible using satellite imagery data for different seasons of the year and for different periods of water content. A study of the dynamics of the lake water resources of the insufficient moisture regions was started using images of Landsat 5 TM Level-1. The analysis of scenes for different periods of water content in 2010 showed a 20 % reduction of the total surface water area within the five test sites located in the south of the Tyumen region for the period from May to August. The quantity of reservoirs are larger than 10 hectares has decreased with 60 to 46. Map-schemes of lake percentage for the periods of different water content for the trial territory were constructed on the basis calculation values of lake percentage. The obtained characteristics of the temporal dynamics of the surface water area, as well as the analysis of the maps of lake percentage, allow us to refine the results of the assessment of the water resources of the lakes of the Russian Federation for the regions of water deficiency.

**KEYWORDS:** water resources, lake percentage, satellite image, map of lake percentage, geoinformation systems.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Несмотря на огромные объемы озерных вод, для Российской Федерации характерна значительная пространственная неоднородность распределения озерного фонда по территории и его слабая согласованность с центрами размещения населения, а также промышленного и сельскохозяйственного производства.

Для оценки пространственной неоднородности распределения озерных водных ресурсов наиболее удобным является анализ показателя озерности территории, который, в отличие от суммарной водной поверхности, является удельной величиной.

Озерность – отношение суммарной водной поверхности озер и искусственно созданных водоемов к площади рассматриваемой территории. Данная характеристика дает общее представление о площади водного покрытия региона и позволяет получить наглядную информацию о пространственном распределении озер. Кроме того, коэффициент озерности является характеристикой, часто применяемой в гидрологических расчетах. Чем больше его величина, тем сильнее естественная зарегулированность стока, проявляющаяся в уменьшении внутригодовых и межгодовых колебаний уровня и расхода воды в речной сети территории, мутности и минерализации речных и озерных водных масс.

В течение нескольких лет в Институте озероведения Российской академии наук проводилась новая оценка ресурсов озерных вод Российской Федерации. Она выполнялась на основе современных космических снимков с применением единой, специально разработанной методики, основанной на использовании возможностей программы «Google Планета Земля» [Измайлова, 2016]. В ходе оценки производился подробный количественный подсчет водоемов по градациям крупности и измерение площадей их водной поверхности. При этом учитывались как естественные, так и искусственные водоемы (пруды, водохранилища, карьеры и т. д.).

Детальность, с которой в рамках оценки водных ресурсов озер происходило определение площадей водной поверхности РФ и полученный огромный пространственно-распределенный массив точечных характеристик делают возможным составление достаточно подробных карт озерности как для всей территории России, так и для отдельных ее регионов. Однако необходимо иметь в виду, что для водоемов, распложенных в пределах зоны недостаточного и неустойчивого увлажнения, характерна значительная изменчивость площади

зеркала как во внутригодовом, так и в многолетнем разрезе. В связи с этим, карта озерности, построенная по осредненным за начало века данным, для таких регионов требует уточнений, которые возможно произвести с использованием материалов космической съемки за разные периоды водности и различные сезоны года.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основой для построения карты озерности РФ явился массив точечных характеристик данного показателя, полученный для различных регионов страны в рамках работ по определению площадей водной поверхности России с использованием программы «Google Планета Земля». Поскольку программа «Google Планета Земля» содержит мозаику снимков за разные сезоны и за разные годы, снятые с ее помощью площади водной поверхности применительно к какой-либо значимой по площади территории принимаются за осредненные. Полученный в рамках работ массив данных содержит более 30 000 значений осредненных за начало XXI в. коэффициентов озерности, равномерно покрывающих всю территорию России.

Для разработки электронной карты озерности Российской Федерации использовались возможности свободной геоинформационной системы с открытым кодом QuantumGIS (QGIS). Практичная рабочая среда системы предоставляет широкие возможности для визуализации больших массивов пространственно-распределенных данных. Также QGIS позволяет параллельно работать со спутниковой информацией.

Для обеспечения хорошей визуализации данных была разработана шкала значений коэффициентов озерности, учитывающая их изменчивость по территории страны. Разграничение озерных районов на карте осуществлялось с учетом данных космических снимков, в отдельных случаях – информации с геоморфологических карт.

Составленная подробная электронная карта озерности (рис. 1) может представлять интерес в качестве средства наглядной визуализации количественных характеристик водной поверхности РФ и ее регионов.

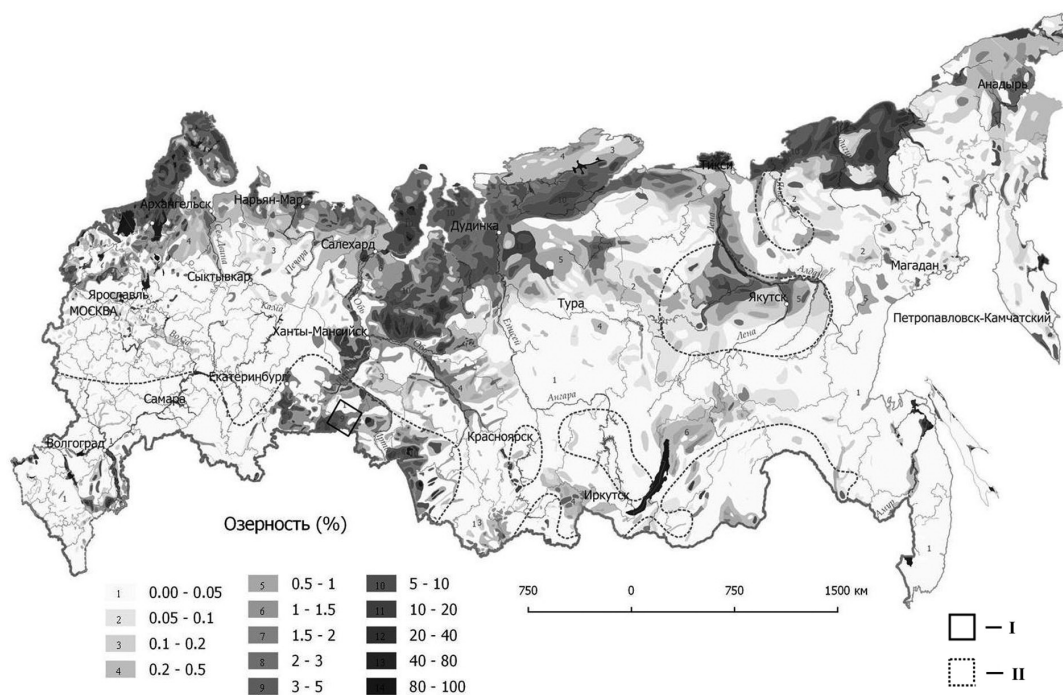


Рис. 1. Озерность территории Российской Федерации:  
I – район исследований; II – регионы недостаточного увлажнения [Атлас..., 1974]

Fig. 1. Lake percentage of the Russian Federation:  
I – study area; II – regions of insufficient moisture [Atlas..., 1974]

Необходимо отметить, что для северных регионов и для регионов, расположенных в пределах зоны неустойчивого и недостаточного увлажнения, значения коэффициентов озерности в разные сезоны и в разные по водности годы могут отличаться от полученных нами средних величин. Это особенно актуально для южных районов страны, характеризующихся повышенной плотностью населения и наличием водного дефицита. В связи с тем, что большинство регионов, расположенных в пределах зоны неустойчивого и недостаточного увлажнения, характеризуются крайне слабой степенью лимнологической изученности, анализ временной изменчивости озерных водных ресурсов в таких регионах требует разработки специального методического обоснования. При этом дефицит натуральных данных может быть восполнен за счет использования спутниковой информации, а именно за счет данных по площадям дешифрируемых озер, снятых со спутниковых снимков в конкретные годы и в конкретный период.

Рассмотрение построенной карты озерного покрытия Российской Федерации (см. рис. 1) свидетельствует о повышенных значениях коэффициента озерности практически для всей территории Западной Сибири, включая ее южную часть, относящуюся к регионам недостаточного увлажнения. Необходимо отметить, что среди всех регионов недостаточного увлажнения, расположенных в пределах России, юг Западной Сибири является одним из наиболее обеспеченных озерными водными ресурсами. Согласно расчетам, проведенным при новой оценке водных ресурсов озер РФ, в южной равнинной части Западной Сибири насчитывается около 15 000 озер площадью более 1 га [Измайлова, Шмакова 2015]. Примерно 10 % водоемов превышают по площади 1 км<sup>2</sup>.

Распределение озер по территории южной части Западной Сибири неравномерное. Наибольшее их количество приходится на Курганскую и Новосибирскую области, много озер в Омской области, на территории Алтайского края, а также в расположенной в пределах зоны недостаточного увлажнения южной части Тюменской области.

Для изучения внутригодовой динамики площадей водоемов юга Западной Сибири были проанализированы снимки TM/Landsat 5 с пространственным разрешением 30 м, полученные посредством сервиса Earth-Explorer [[http:// Earthexplorer.usgs.gov/](http://Earthexplorer.usgs.gov/)]. Обработке были подвергнуты сцены за 9 мая, 20 июля, 29 августа и 1 ноября 2010 г.

На основе анализа спутниковой информации рассчитывались изменения количества и площадей водоемов на каждую дату в пределах пяти тестовых участков размером 14 × 14 км (рис. 2), расположенных на юге Тюменской области в зоне недостаточного увлажнения.

Озера исследуемых участков приурочены к Тоболо-Ишимской лесостепи, представляющей собой плоскую равнину со средними высотами около 100 м [Водно-болотные..., 1998].

При определении площадей озер выполнялось визуальное дешифрирование многозонального изображения с цифрованием контура береговой линии в среде Quantum-GIS. Выделение границы водной поверхности и суши производилось на основе анализа комбинации изображений ближнего инфракрасного, среднего инфракрасного и красного видимого каналов. Использовались многоканальные водные индексы NDWI и MNDWI [Ху, 2006; Курганович, Носкова, 2015]:

$$NDWI = b_2 - b_4/b_2 + b_4,$$

где  $b_2$ ,  $b_4$  – интенсивность излучения в спектральных каналах 2 и 4 TM/Landsat

$$MNDWI = b_2 - b_5/b_2 + b_5,$$

где  $b_2$ ,  $b_5$  – интенсивность излучения в спектральных каналах 2 и 5 TM/Landsat



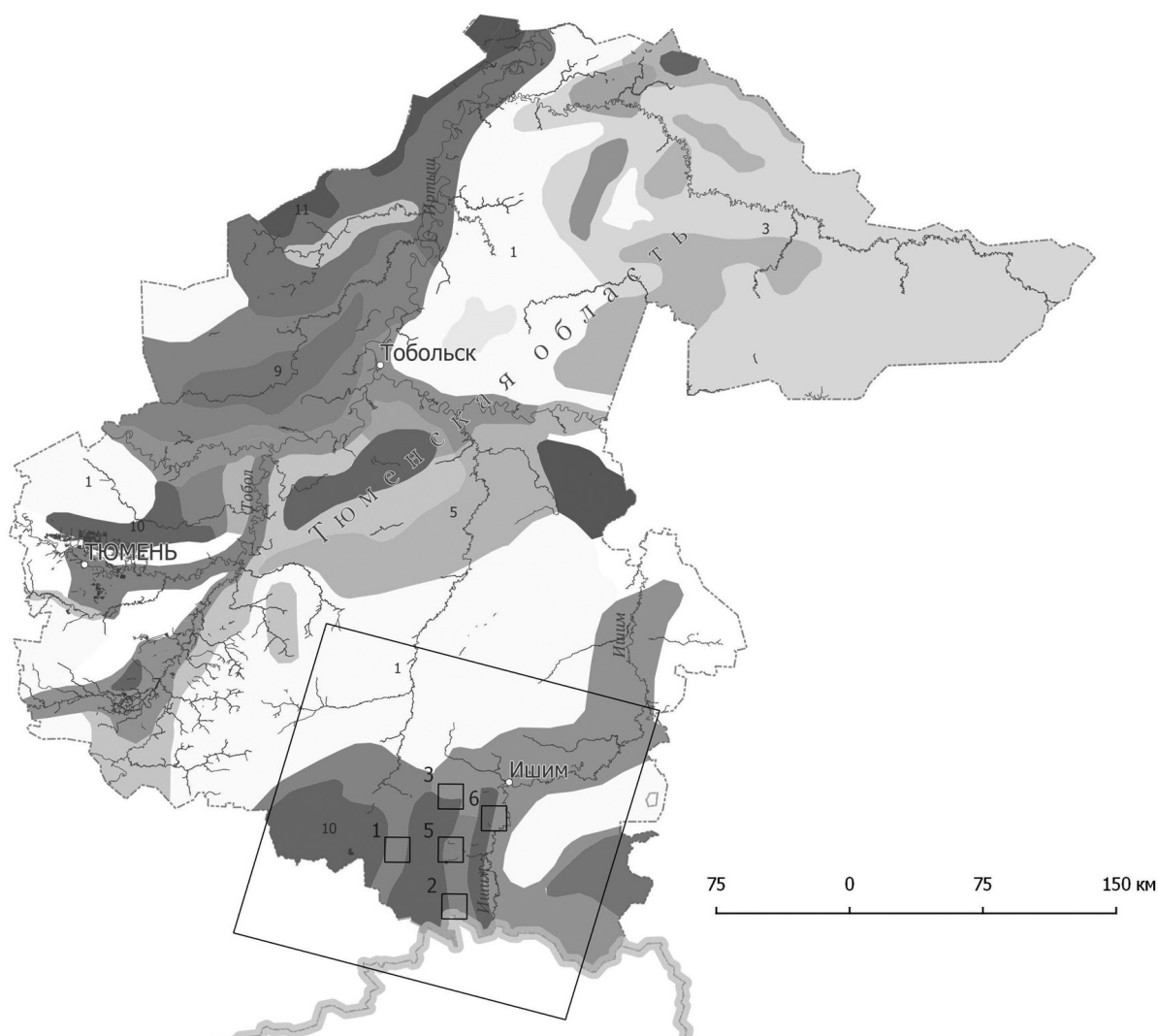


Рис. 2. Озерность Тюменской области и расположение тестовых участков исследований.  
Условные обозначения соответствуют рис. 1.

Fig. 2. Lake percentage of Tyumen Region and the location of the study sites.  
Symbols correspond to the Fig. 1

Из исследования динамики площадей при итоговых расчетах были исключены озера с площадью зеркала менее 10 га в связи с большой погрешностью определения их морфометрических характеристик на снимках ТМ/Landsat среднего пространственного разрешения.

На основе полученного материала производилось определение коэффициентов озерности для периодов различной водности в пределах каждого тестового участка. Значения озерности рассчитывались с учетом всех водоемов, подвергавшихся дешифрированию, в том числе менее 10 га.

## РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Согласно проведенной в Институте озероведения РАН оценке, средний коэффициент озерности Российской Федерации, рассчитанный с учетом искусственных водоемов, составляет ~2,3 %, с учетом только естественных водоемов ~1,9 % [Измайлова, 2016].

В различных районах Российской Федерации озерность изменяется от практически нулевых значений до величин, превышающих несколько десятков процентов. В естественных условиях наибольшей озерностью (см. рис. 1) характеризуются северные территории – Кольско-Карельский сегмент Балтийского кристаллического щита (среднее значение 13–6 %) и северо-запад Русской плиты (6 %), где доминируют озерные котловины ледникового происхождения. Повышенная озерность характерна и для морских, моренных и водно-ледниковых равнин севера Сибири (5–4 %) и севера Русской равнины (2,6 %), где преобладающие по количеству термокарстовые водоемы соседствуют с речными, ледниковыми, морскими, суффузионными и тектоническими. Максимальные значения озерности (до 30 % и более) наблюдаются здесь, прежде всего на речных поймах и низких террасах, тогда как для дренированных водораздельных пространств характерны пониженные коэффициенты озерности. Повышенная озерность отмечается практически на всей территории Западной Сибири (3,3 %). Для равнинных регионов, подвергавшихся оледенениям, озерность составляет более 4 %, за пределами распространения оледенения она несколько снижается. Однако даже в южной равнинной части Западной Сибири, расположенной в зоне неустойчивого и недостаточного увлажнения, показатель озерности в среднем составляет около 2 %.

Среди всех регионов РФ, относящихся к зоне недостаточного увлажнения, юг Западной Сибири, включая верхнюю часть бассейна Урала, части бассейнов Иртыша и его основных притоков – Ишима и Тобола, бассейн Верхней Оби и бессточные области междуречий Оби и Иртыша, характеризуется наибольшей озерностью. Как уже указывалось выше, характерной чертой зоны недостаточного увлажнения является высокая временная изменчивость водных ресурсов (включая озерные воды) как во внутригодовом, так и в многолетнем разрезе. В этой связи уточнение результатов проведенной в ИНОЗ РАН оценки озерных ресурсов регионов Российской Федерации за счет учета их значительной изменчивости в регионах водного дефицита производилось с использованием материалов космической съемки за разные периоды водности и различные сезоны года. Анализ построенных карт озерности, а также данных оценки озерного фонда проводился на примере территории Тюменской области, частично расположенной в зоне недостаточного увлажнения.

Основываясь на полученных нами данных, можно отметить, что примерно треть территории Тюменской области занимают районы с коэффициентом озерности, не превышающим 0,1 %. Около 15 % площади области характеризуется озерностью от 0,1 до 0,2 %. Коэффициент озерности более 5 % наблюдается на территориях, суммарно составляющих около 8 % площади, в том числе на районы с озерностью от 5 до 10 % приходится 6 % территории, а на районы с коэффициентом более 10 % – 2 % (см. рис. 2).

Проведенный анализ сцен ТМ/Landsat 5 за различные периоды водности свидетельствует, что на тестовых участках в конце июля 2010 г. отмечается уменьшение суммарной площади озер крупнее 0,1 км<sup>2</sup> по сравнению с началом мая (рис. 3).

Наибольшее сокращение площади водной поверхности наблюдается на фрагментах № 3 «Долгое» и № 5 «Светлое» (примерно 45 и 35 % соответственно) (рис. 4). Для фрагмента № 2 «Песчаное» отмечено уменьшение площади зеркала озер в июле на 10 %. Самые низкие показатели изменения водной поверхности получены для тестового участка № 6 «Травное» (около 3 %), более 1/2 площади водного зеркала которого приходится на три крупных водоема.

В среднем к концу июля площадь водоемов уменьшается более чем на 15 %. Общее число водоемов крупнее 0,1 км<sup>2</sup> сокращается с 60 до 46. Разница рассчитанных значений суммарной площади водной поверхности в августе и июле составляет около 4,5 %.

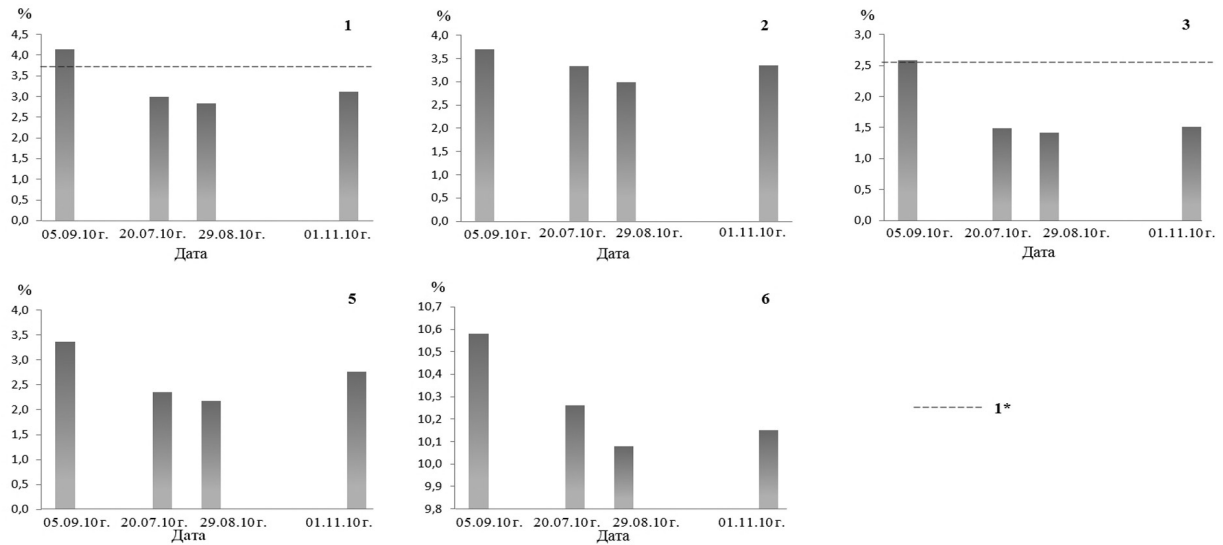


Рис. 3. Изменение суммарной площади водного покрытия для территорий тестовых участков № 1–3, 5, 6 в мае, июле, августе и ноябре 2010 г.

Fig. 3. The total area of water surface variations of the test sites No 1–3, 5, 6 in May, June, August and November 2010

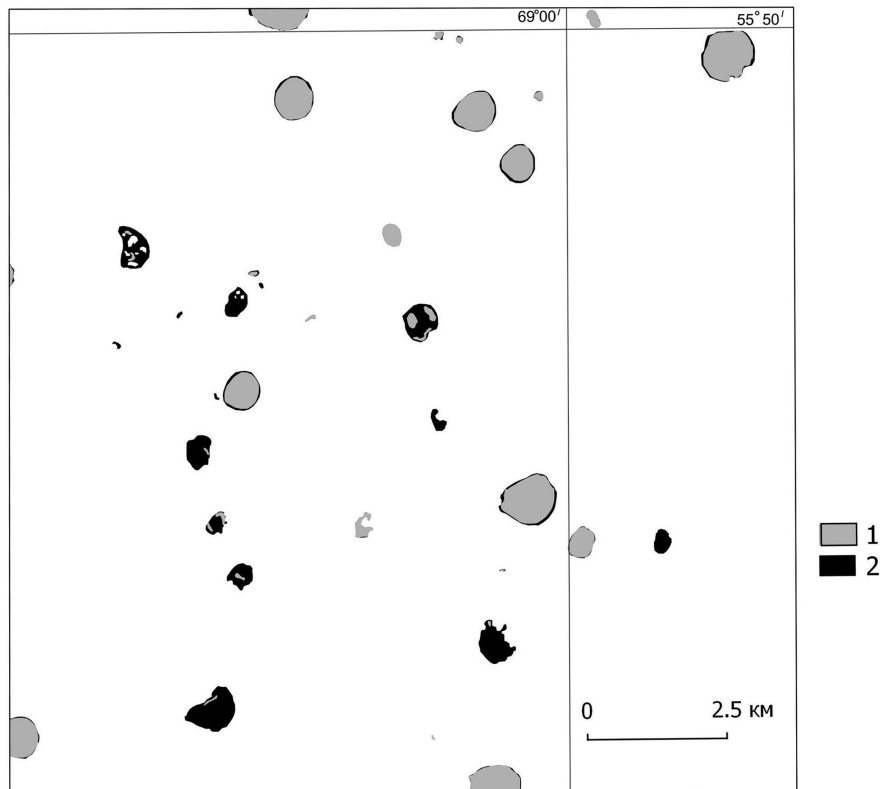


Рис. 4. Изменение площади водной поверхности тестового участка № 5 в 2010 г.:  
1 – площадь озер 29 августа 2010 г., 2 – сокращение площади озер в период с мая по август 2010 г.

Fig. 4. Variations of water-surface lake area of test site No 5 in 2010:

1 – water-surface lakes area August 29, 2010, 2 – water-surface lake area reduction from May to August, 2010

В ноябре установлено увеличение площади водного зеркала озер крупнее 10 га примерно на 8 % по отношению к августу.

Полученный материал делает возможным определение показателя озерности для территорий каждого участка для периодов различной водности (рис. 5). Для фрагмента № 1 в мае рассчитанный коэффициент озерности (4,2 %) превышает среднемноголетнюю величину, полученную в ходе проведенной ранее в ИНОЗ РАН оценки (3,23 %). В то же время рассчитанные для периода с середины июля до начала ноября значения несколько ниже (3,1–2,8 %).

Коэффициент озерности тестового участка № 3 в июле, августе и ноябре существенно ниже (1,4–1,5 %), а в мае – соответствует установленному ранее в ИНОЗ РАН показателю (2,6 %).

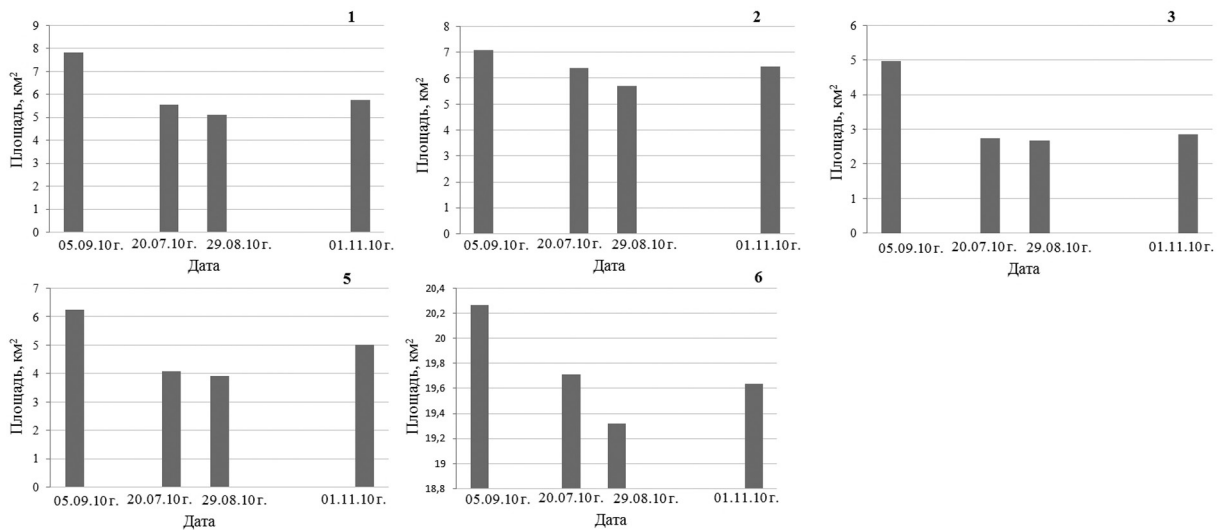


Рис. 5. Коэффициенты озерности (%) территорий тестовых участков № 1–3, 5, 6 в мае, июле, августе и ноябре 2010 г.

1\* – показатель озерности по данным ИНОЗ РАН [Измайлова, 2016]

Fig. 5. Lake percentage (%) of test sites No 1–3, 5, 6 in May, June, August and November 2010  
1\* – Lake percentage by data IL RAS [Izmailova, 2016]

На основе полученных характеристик озерного покрытия были разработаны предварительные карты-схемы озерности для пробной тестовой территории, соответствующие различным периодам водности (начало мая и конец августа 2010 г.) (рис. 6).

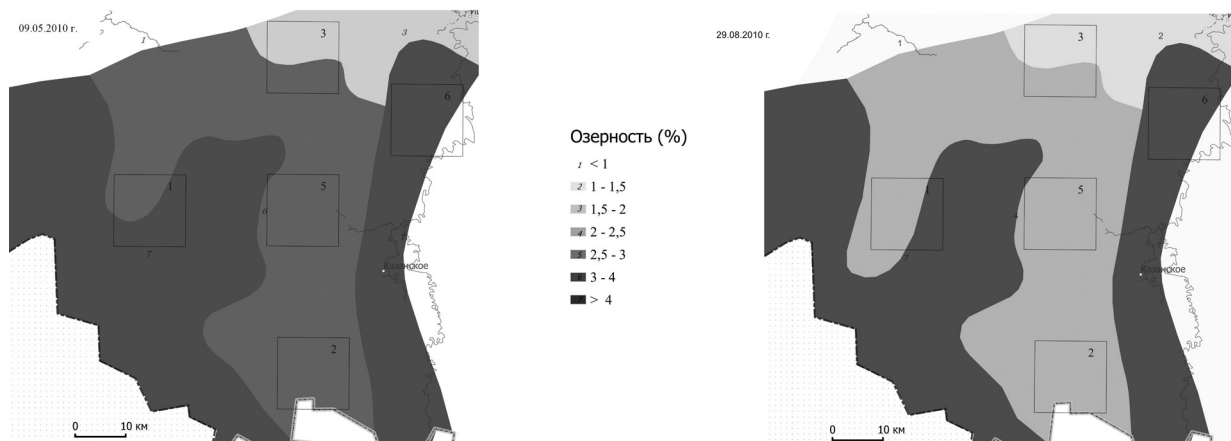


Рис. 6. Озерность региона исследования в мае и августе 2010 г.  
Fig. 6. Lake percentage of study area in May and August 2010



Расширение шкалы значений, а также введение дополнительных тестовых площадей (фрагменты № 2, 5, 6), уточняющих результаты проведенной ранее оценки, делают более обоснованным разграничение озерных районов при детальной визуализации пространственной и временной неоднородности озерного водного покрытия.

## **ВЫВОДЫ**

Регионы недостаточного увлажнения характеризуются низкой лимнологической изученностью, лишь относительно небольшое количество расположенных здесь озер входит в систему мониторинга Росгидромета. Оценка временной изменчивости озерных водных ресурсов таких регионов требует специального методического обоснования и, в значительной степени, может быть решена за счет использования спутниковых данных за различные по водности годы и сезоны. Данные по временной изменчивости площадей зеркала тестовых озер, расположенных в регионах недостаточного увлажнения, полученные на основе анализа спутниковой информации, дают возможность оценить изменения площадей водной поверхности обширных территорий в годы разной водности и в разные периоды.

В связи со значительными внутригодовыми изменениями уровня воды исследования многолетней динамики водоемов зоны водного дефицита по космическим снимкам целесообразно проводить на основе анализа сцен, полученных за разные годы за близкие даты съемки.

На основе изучения разновременных спутниковых снимков выявлено уменьшение коэффициентов озерности тестовых территорий на юге Тюменской области в различные периоды водности, превышающее для некоторых районов 1,2 %. Анализ построенных для небольшого тестового региона карт озерности, а также полученных характеристик временной динамики водной поверхности показал, что описанный в статье подход позволяет проводить необходимые уточнения результатов оценки водных ресурсов озер РФ для наиболее нуждающихся в водных ресурсах регионов.

В дальнейшем предполагается продолжить начатую работу и, с учетом накопленного опыта, провести оценку изменений площадей водной поверхности уже в двух временных масштабах – для лет различной водности (очень многоводные годы ( $P < 16,7\%$ ), многоводные годы ( $16,7\% \leq P < 33,3\%$ ), средние по водности годы ( $33,3\% \leq P < 66,7\%$ ), маловодные годы ( $66,7\% < P \leq 83,3\%$ ) и очень маловодные годы ( $P > 83,3\%$ ) и для наблюдаемых в такие годы минимальных и максимальных месячных значений уровня воды.

## **БЛАГОДАРНОСТИ**

Работа выполнена в рамках государственного задания ИНОЗ РАН по теме № 0154-2014-0005 (гос. регистрация № АААА-А18-118021590191-6) «Пространственная структура озерных и речных водных ресурсов России и ее изменение во времени».

## **ACKNOWLEDGEMENTS**

The study was funded by the state task No 0154-2014-0005 "Spatial structure of lake and river water resources of Russia and its change in time".

## **СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Атлас мирового водного баланса / приложение к монографии «Мировой водный баланс и водные ресурсы Земли». М.; Л.: Гидрометеиздат, 1974. 65 карт.
2. Водно-болотные угодья России / Под общ. ред. В.Г. Кривенко. Т. 1. Водно-болотные угодья международного значения. М., 1998. 255 с.
3. *Измайлова А.В.* Водные ресурсы озер Российской Федерации // География и природные ресурсы. 2016. № 4. С. 5–14. DOI: 10.21782/GiPR0206-1619-2016-4(5-14).

4. *Измайлова А.В., Шмакова М.В.* Временная изменчивость водных ресурсов озер, расположенных в регионах недостаточного увлажнения. Всерос. научная конф. с междунар. участием «Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов», Москва, 15–18 сентября 2015.
5. *Курганович К.А., Носкова Е.В.* Использование водных индексов для оценки измерения площадей водного зеркала степных содовых озер юго-востока Забайкалья, по данным дистанционного зондирования // Вестн. ЗабГУ. 2015. № 6 (121). С. 16–23.
6. *Xu H.* Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // International Journal of Remote Sensing. 2006. No 27. P. 3025–3033.

#### REFERENCES

1. Atlas of world water balance. World water balance and water resources of the Earth. M.; L., 1974. 65 maps (in Russian).
2. *Izmailova A.V.* Water resources of the lakes of Russia. Geography and natural resources. 2016. No 4. P. 5–14 (in Russian). DOI: 10.21782/GiPR0206-1619-2016-4(5-14).
3. *Izmailova A.V., Shmakova M.V.* Temporal variability of lakes water resources located in the regions of insufficient moisture. Fundamental Problems of Water and Water resources: proceedings of IV Russian Scientific. Conference. M.: Water Problems Institute RAS, 2015. P. 69–82 (in Russian).
4. *Kurganovich K.A., Noskova E.V.* The estimation of water surface variations of steppe soda lakes in the southeast of transbaikale with using of remote sensing of water indices. Vestn. Zab. Gos. Univ. (Transbaikal State University Journal). 2015. No 6 (121). P. 16–23 (in Russian).
5. Wetlands in Russia. V. 1. Wetlands of international importance. Chief editor V.G. Krivenko. M., 1998. 255 p. (in Russian).
6. *Xu H.* Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing. 2006. No 27. P. 3025–3033.