

## Климатогенная динамика озер в экотоне лесостепи Забайкалья

С. Т. ИМ<sup>1,2,3</sup>, В. И. ХАРУК<sup>1,2</sup>, Н. М. РАКИТЯНСКАЯ<sup>2</sup>, А. С. ГОЛЮКОВ<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН  
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28

<sup>2</sup> Сибирский федеральный университет  
660041, Красноярск, просп. Свободный, 79

<sup>3</sup> Сибирский государственный аэрокосмический университет им. М. Ф. Решетнева  
660014, Красноярск, просп. Красноярский рабочий, 31  
E-mail: [stim@ksc.krasn.ru](mailto:stim@ksc.krasn.ru), [kharuk@ksc.krasn.ru](mailto:kharuk@ksc.krasn.ru)

Статья поступила 12.11.2014

Принята к печати 10.02.2015

### АННОТАЦИЯ

На основе спектрорадиометрии (спутник Landsat), гравиметрии (спутник GRACE) и альтиметрии (спутник Envisat) исследована динамика количества, площади и уровня водной поверхности озер лесостепной зоны Забайкалья. Количество и площадь поверхности озер коррелируют с количеством осадков ( $r = 0,84...0,85$ ), летними и годовыми температурами ( $r = -0,77... -0,9$ ) и индексом сухости ( $r = 0,95...0,97$ ). В экстремально засушливые периоды (2006–2010 гг.) наблюдалось четырехкратное уменьшение количества озер (по сравнению с 1989 г.) и трехкратное – их площади (по сравнению с 2000 г.). Установлена периодичность (~ 29 лет) изменения уровня водной поверхности озер Забайкалья.

**Ключевые слова:** динамика озер, лесостепь Забайкалья, Landsat, GRACE, альтиметрия, индекс SPEI.

Воздействие изменений климата на гидрологический режим территорий прогнозируется преимущественно в бореальной зоне, где наблюдаемые изменения температуры существенно выше, чем в целом по планете [IPCC, 2014]. Наибольшему риску подвержены переходные зоны (экотоны) между территориями с различными гидрологическими режимами. Таковыми, в частности, являются: зона островных многолетнемерзлых поч-

вогрунтов; экотон лесостепи; переходная зона между степями и пустынями, где температура и/или осадки являются основными факторами, определяющими водный режим [Jordan et al., 2006; Обязов, Смахтин, 2012; Kharuk et al., 2013a, b].

В данной работе рассматривается влияние климатических переменных на количество и площадь поверхности озер, расположенных в экотоне лесостепи Забайкалья. В

указанном регионе выпадает сравнительно небольшое (~300 мм) количество осадков, типичны периодические засухи, усиливающиеся в последние десятилетия.

Наблюдаемую в бореальной зоне динамику озер большинство исследователей связывает с изменениями климата. Так, согласно L. C. Smith et al. [2005], в Западной Сибири в зоне сплошной мерзлоты возросло количество и площадь озер, в то время как в зоне прерывистой мерзлоты происходило их сокращение. По данным J. M. Karlsson et al. [2014] в период с 1973 по 1987 г. на севере Западной Сибири происходило увеличение количества и площади озер, в то время как в последующий период (с 1988 по 2009 г.) – уменьшение. В Якутии, согласно В. И. Кравцовой и Т. В. Тарасенко [2011], в период с 1973 по 2009 г. увеличивалась площадь термокарстовых озер. В зоне прерывистой мерзлоты Аляски с 1950 по 2002 г. наблюдалось снижение числа и площади озер [Riordan et al., 2006]. В период с 1979 по 2009 г. площадь озер на Аляске уменьшилась на 3,4 % [Rover et al., 2012]. Количество озер уменьшалось преимущественно в зонах деградации вечной мерзлоты [Jepsen et al., 2013; Roach et al., 2013]. В зоне прерывистой мерзлоты Тибетского плато также сокращалось число озер, тогда как в зоне вечной мерзлоты этот показатель возрастал [Huang et al., 2011]. В Забайкалье неоднократно отмечались изменения уровня поверхности озер [Баженова, 2007; Обязов, Смахтин, 2012].

В анализе динамики озер широко используется дистанционное зондирование. Наряду со спектрорадиометрической съемкой, позволяющей отслеживать динамику площади и количества озер [Smith et al., 2005; Jepsen et al., 2013; Roach et al., 2013], применяются методы альтиметрии, дающие оценку уровня водной поверхности [Birkett et al., 2011]. В последнее время в исследованиях аномалий водной массы находят применение данные гравиметрической съемки со спутников GRACE [Tangdamrongsub et al., 2011].

Цель данной работы – анализ временной динамики количества и площади водной поверхности озер Забайкалья по материалам спектрорадиометрической и гравиметрической съемок. Рассматривались следующие аспекты проблемы: 1) какова динамика коли-

чества и площади озер Забайкалья? 2) наблюдается ли связь вышеуказанных параметров с климатическими переменными? 3) существует ли цикличность в количестве и площади озер?

## МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Анализируемая территория (~26 тыс. км<sup>2</sup>) расположена в лесостепи Забайкалья, между границами криолитозоны и степями и полупустынями Центральной Азии, в зоне сочленения бассейна верхнего Амура с бессточным Улдзя-Торейским бассейном (рис. 1). Включает бессточные соленые озера Барун-Торей и Зун-Торей, а также многочисленные мелкие горько-соленые озера. Водоемы обводняются за счет осадков и временных поверхностных водотоков. Глубина оз. Зун-Торей достигает 6,5 м; площадь – 300 км<sup>2</sup>. Площадь оз. Барун-Торей – 580 км<sup>2</sup>; глубина – до 4 м [Корнутова, 1968]. Средняя высота рельефа исследуемой территории составляет 600–700 м (с максимальными отметками до 835 м). Климат региона резко континентальный со среднегодовой температурой –0,5 °С. Количество годовых осадков составляет в среднем 305 ± 16 мм в год, в засушливые периоды – менее 150 мм в год ([http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru\\_ts\\_3.22](http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_3.22)). Характерны продолжительные (до полугода) засухи и высокие летние температуры (до +45 °С и выше).

Площадь и количество озер определялись по снимкам Landsat (-2/MSS, -5/TM, -7/ETM, -8/OLI; величина пиксела 30–60 м). Снимки получены с сайта <http://glovis.usgs.gov>; время съемки – июль – октябрь 1976–2013 гг.

Динамика водной массы оценивалась по данным гравиметрической съемки GRACE, выполненной в период с 2003 по 2014 г. (<http://grace.jpl.nasa.gov>). Данные GRACE позволяют построить высокоточную модель гравитационного поля Земли [Landerer, Swenson, 2012]. Учитывая различные факторы, ученые из НАСА по данным GRACE вычисляют помесечные изменения суммарной массы воды, сосредоточенной на поверхности и под землей [Landerer, Swenson, 2012]. Материалы представляют собой гридовые среднемесячные величины аномалий водного эквивалента массы (АВЭМ), представленные в санти-

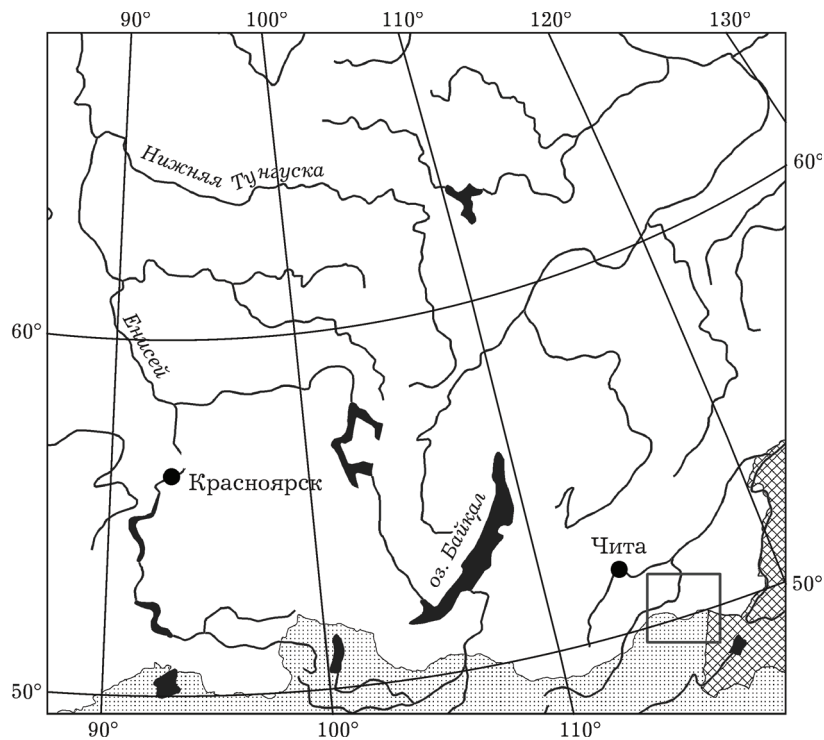


Рис. 1. Исследуемая территория (обозначена прямоугольником)

метрах с пространственным разрешением в  $1^\circ$  ( $\sim 72 \times 110 \text{ км}^2$  для с. ш.  $50^\circ$ ). Средняя ошибка измерений АВЭМ достигает 0,4 см в районе Забайкалья (<http://grace.jpl.nasa.gov>). Покрытие съемкой Landsat составляет примерно  $180 \times 175 \text{ км}^2$ . Таким образом, анализируемая территория покрывается шестью пикселями данных GRACE. Поскольку динамика суммарной площади озер и их количества по данным Landsat характеризует общие тенденции изменения поверхностной массы воды в пределах анализируемой сцены Landsat, то они должны согласоваться с динамикой наземной и подземной водной массы, оцененной по данным GRACE.

Динамика уровня водной поверхности оз. Барун-Торей определялась по данным альтиметрии со спутника Envisat (2003–2010 гг.), полученным с сайта “USDA Global Reservoir and Lake Monitor” ([http://www.pecad.fas.usda.gov/cropexplorer/global\\_reservoir](http://www.pecad.fas.usda.gov/cropexplorer/global_reservoir)). Данные по временной динамике озер в “до-спутниковый” период получены из литературных источников [Обязов, 1994; Баженова, 2007].

Сведения дистанционного зондирования анализировались в программной среде Erdas Imagine (<http://www.hexagongeospatial.com/>

products/erdas-imagine) и ESRI ArcGIS (<http://www.esri.com>). Дешифрирование производилось с использованием топокарт М 1 : 100 000. На предварительном этапе обработки из анализируемой области удалялись участки речных русел, облаков и теней, а также элементы растительного покрова. Последнее выполнялось по величине нормализованного вегетационного индекса: из рассмотрения удалялись участки с величиной NDVI > 0. Далее для водных и минерализованных поверхностей формировались обучающие выборки (в среднем по 15 на каждый снимок). Каждая выборка включала от 12 до  $10^5$  пикселей; средняя величина перепутывания выборок составила <2%. Классификация выполнялась методом максимального правдоподобия. Точность полученных картосхем озер, оцененная методом капша-статистики, соответствует высокому уровню ( $\kappa = 0,95\dots 0,97$ ).

Для каждого временного среза рассчитывались площади и количество озер. Озера подразделялись на большие ( $>1 \text{ км}^2$ ) и малые ( $\leq 1 \text{ км}^2$ ). Общее число варьировало (в зависимости от года), от 243 до 1061 шт.; количество малых составляло 82–95%. Если

какое-либо озеро при высыхании дробилось на части, то эти части интерпретировались как единое целое с помощью ГИС-анализа. Для этого составлялась растровая маска максимальных площадей всех водных поверхностей за наблюдаемый период. В данной маске каждый кластер соответствовал отдельному озеру с его максимальной площадью за наблюдаемый период. К маске применен ГИС-инструмент Clump, который позволил присвоить каждому кластеру уникальный код. Таким образом, каждая пространственно-разделенная водная поверхность в пределах маски имела уникальный код. Полученная маска водных поверхностей применена ко всем классификационным картам в соответствии с условным оператором: если  $A_{ij} = 0$ , то  $B_{ij} = 0$ , иначе  $B_{ij} = M_{ij}$ , где  $A$  – значения исходной классификационной карты водных поверхностей,  $B$  – перекодированная классификационная карта водных поверхностей,  $M$  – маска максимальных площадей всех водных поверхностей; соответствующие значения пикселей – в  $i$ -ой

строке и  $j$ -ом столбце. Таким образом, если водная поверхность дробилась на две части в результате высыхания, то она интерпретировалась как единое целое, т. е. ее части имели одинаковый код. Количество и площадь водных поверхностей рассчитывались из гистограмм перекодированных классификационных картосхем. Для выявления цикличности в динамике озер применен Фурье-анализ.

Климатические переменные (осадки, температура, индекс засушливости SPEI; рис. 2) получены с сайтов [http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru\\_ts\\_3.22](http://www.cru.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_3.22) [Harris et al., 2014] и <http://sac.csic.es/spei>. Анализируемые климатические переменные имеют пространственное разрешение  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$  ( $\sim 36 \times 55 \text{ км}^2$ ).

Индекс SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index) определяется формулой:

$$\text{SPEI} = P - \text{PET},$$

где  $P$  – величина осадков,  $\text{PET}$  – потенциальная эвапотранспирация [Vicente-Serrano et al., 2010].

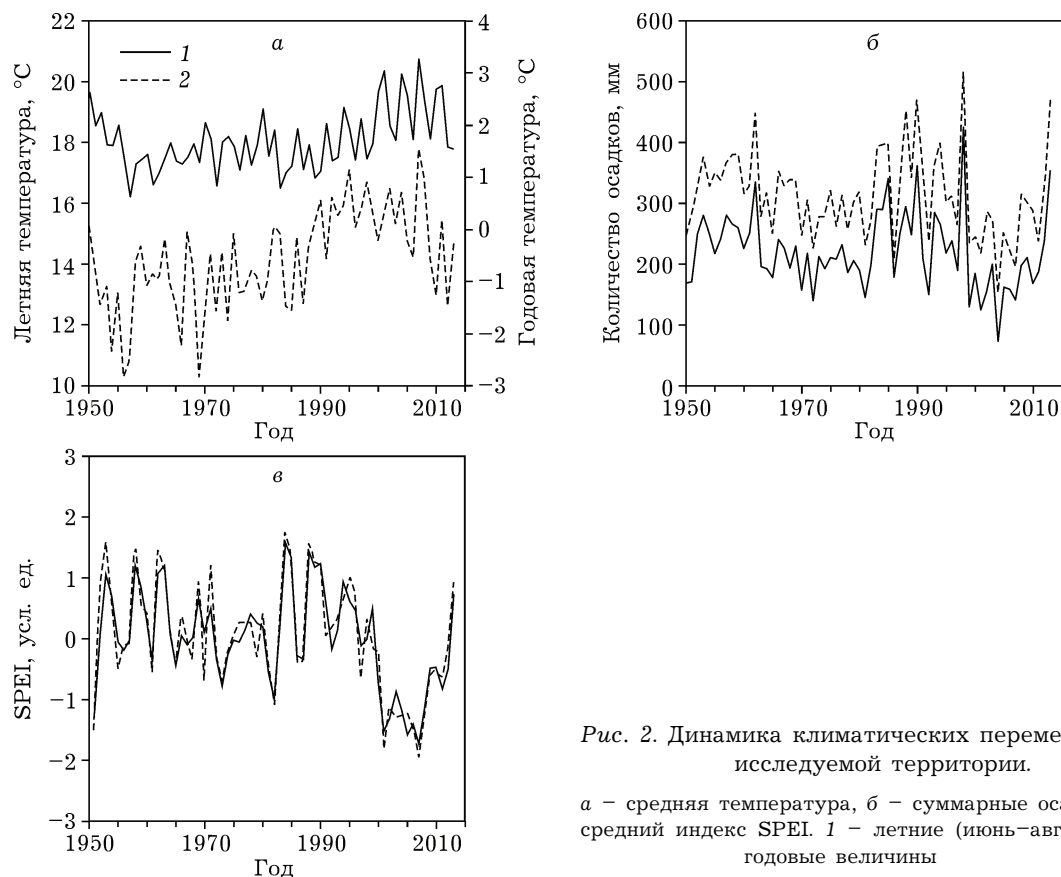


Рис. 2. Динамика климатических переменных на исследуемой территории.

*a* – средняя температура, *б* – суммарные осадки, *в* – средний индекс SPEI. 1 – летние (июль–август), 2 – годовые величины

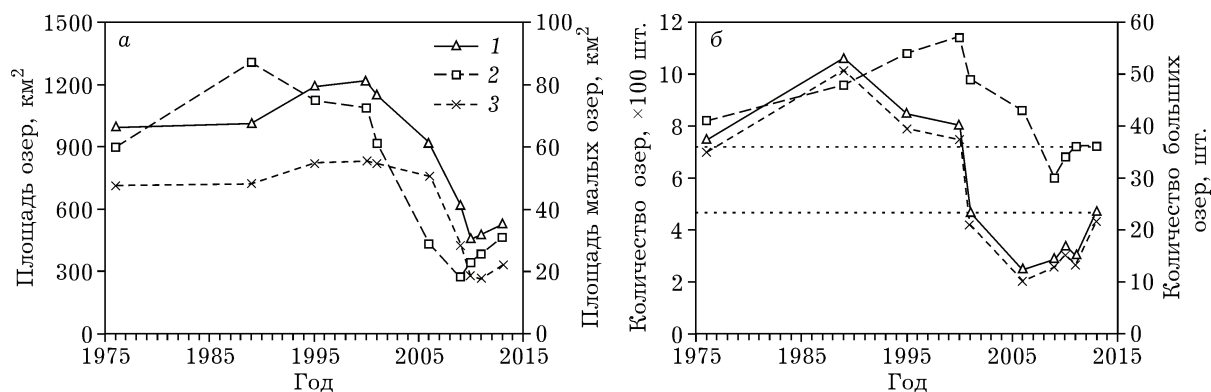


Рис. 3. Динамика площади и количества озер (а): 1 – площадь всех озер, 2 – площадь озер Зун-Торей и Барун-Торей (б): 1 – всех озер, 2 – малых озер, 3 – больших озер

Корреляционные связи между климатическими переменными и динамикой озер (площадь и количество, данные альтиметрии и гравиметрии) анализировались с помощью программ Microsoft Excel и Statsoft Statistica (<http://www.statsoft.ru>). Поскольку высыхание озер представляет инерционный процесс (относительно текущих климатических переменных), корреляционный анализ выполнялся как по текущим значениям метеопараметров, так и с запаздыванием; величина последнего рассчитывалась от одного до пяти лет.

## РЕЗУЛЬТАТЫ

**Динамика площади и количества озер.** В период с 1989 по 2006 г. произошло резкое (в 4 раза) сокращение числа озер (рис. 3). Уменьшение площади озер происходило с запаздыванием (по отношению к количеству); к 2010 г. площадь уменьшилась в 3 раза по сравнению с максимумом в 2000 г. (см. рис. 3).

**Динамика озер и климатические переменные.** На рис. 4 представлена вековая динамика уровня оз. Барун-Торей. График построен по данным наземных наблюдений [Обязов, 1994], материалам съемки Landsat и альтиметрии [Birkett et al., 2011]. На протяжении периода наблюдений (1900–2010 гг.) произошло несколько циклов изменения уровня оз. Барун-Торей. Величина цикла, согласно проведенному Фурье-анализу, составляет ~ 29 лет.

В последние десятилетия (1983–2010 гг.) наблюдается тесная связь между уровнем озер и температурой ( $r = -0,76$ ;  $\alpha < 0,007$ ), осадками ( $r = 0,80$ ;  $\alpha < 0,003$ ) и индексом сухости SPEI ( $r = 0,85$ ;  $\alpha < 0,001$ ; см. рис. 4). Индекс сухости также тесно коррелирует с количеством и площадью озер ( $r = 0,95$  ( $\alpha < 0,001$ ) и  $r = 0,81-0,97$  ( $\alpha < 0,009$ ) соответственно; рис. 5). При этом максимум корреляции наблюдается при усреднении значений климатических переменных за текущий и четыре предшествующих года.

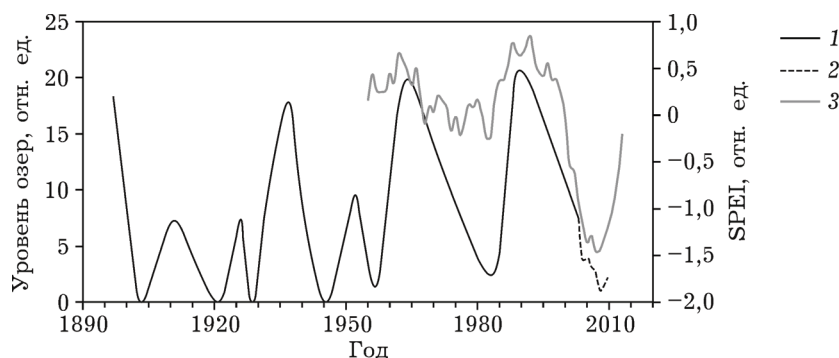


Рис. 4. Динамика уровня оз. Барун-Торей. 1, 2 – уровень озера по данным многолетних наблюдений и альтиметрии соответственно, 3 – величина SPEI (летний период)

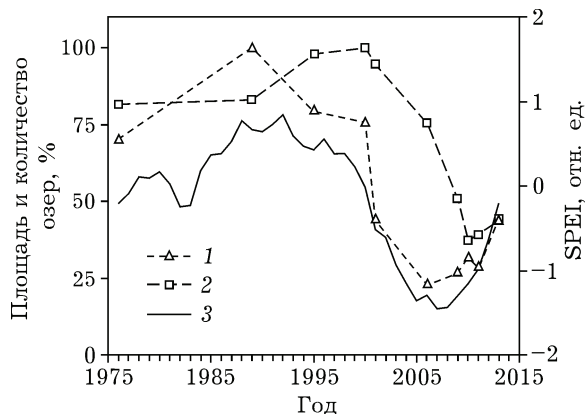


Рис. 5. Временная динамика озер и индекса сухости SPEI. 1 – площадь озер (в % от максимальной величины), 2 – количество озер (в % от максимального), 3 – индекс SPEI

Высоки и значимы коэффициенты линейной регрессии между количеством озер и аномалиями температур, осадков и SPEI ( $R^2 = 0,71...0,91$ ;  $\alpha < 0,005$ ; рис. 6). Меньшие величины коэффициентов регрессии наблюдаются между динамикой площади и летни-

ми температурами и SPEI ( $R^2 = 0,37...0,47$ ;  $\alpha < 0,06$ ); с осадками связь незначима.

**Данные гравиметрии.** Минимум водной массы по данным гравиметрии соответствует 2008 г. (рис. 7). Между данными гравиметрии и количеством озер существует тесная корреляция: с общим количеством озер  $r = 0,99$  ( $\alpha < 0,06$ ), количеством малых озер  $r = 0,99$  ( $\alpha < 0,009$ ; рис. 8). Достоверной связи между динамикой площади озер и данными GRACE не обнаружено.

### ОБСУЖДЕНИЕ

Лесостепь Забайкалья, включающая многочисленные озера, представляет переходную зону между южно-таежными лесами Сибири, степями и пустынями Центральной Азии, что определяет чувствительность гидрологического режима территории к колебаниям климата. Количество и площадь водной поверхности озер тесно связаны с климатическими переменными – индексом сухости, тем-

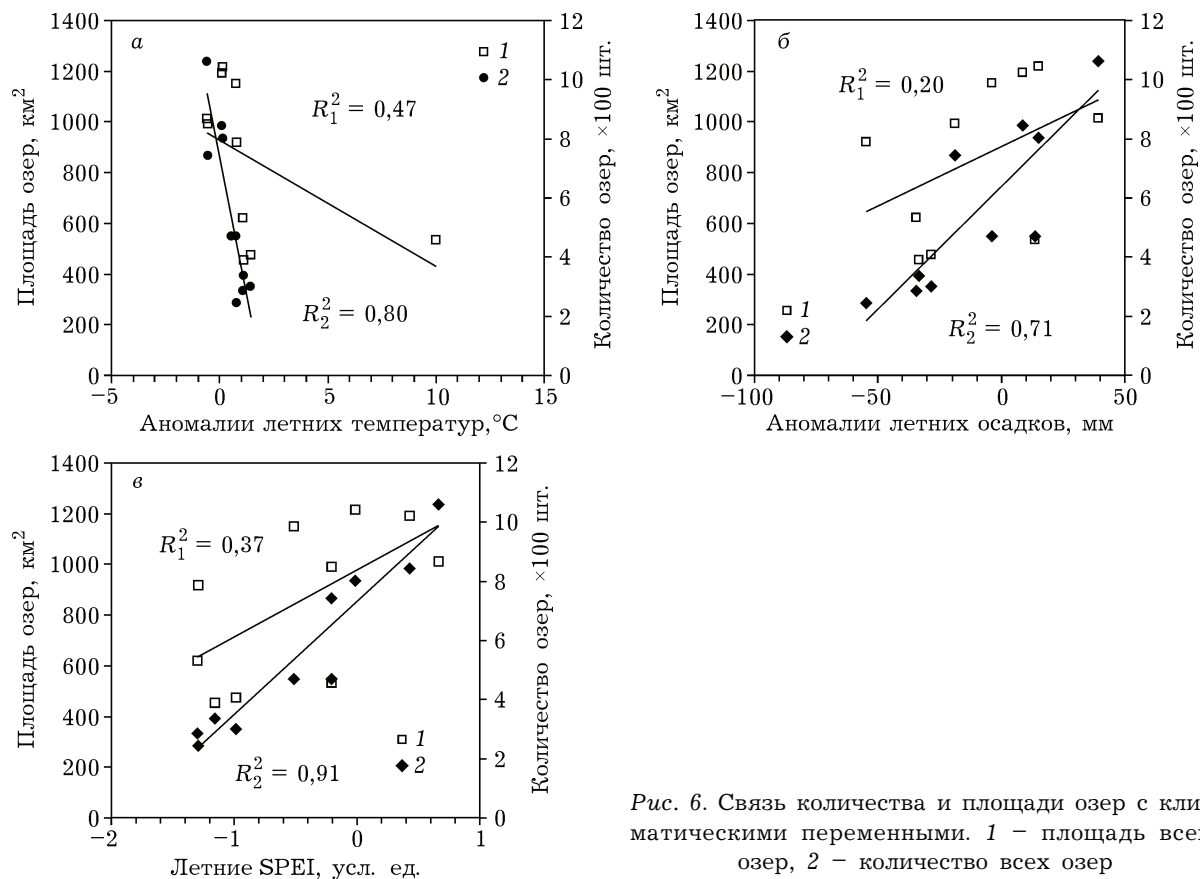


Рис. 6. Связь количества и площади озер с климатическими переменными. 1 – площадь всех озер, 2 – количество всех озер

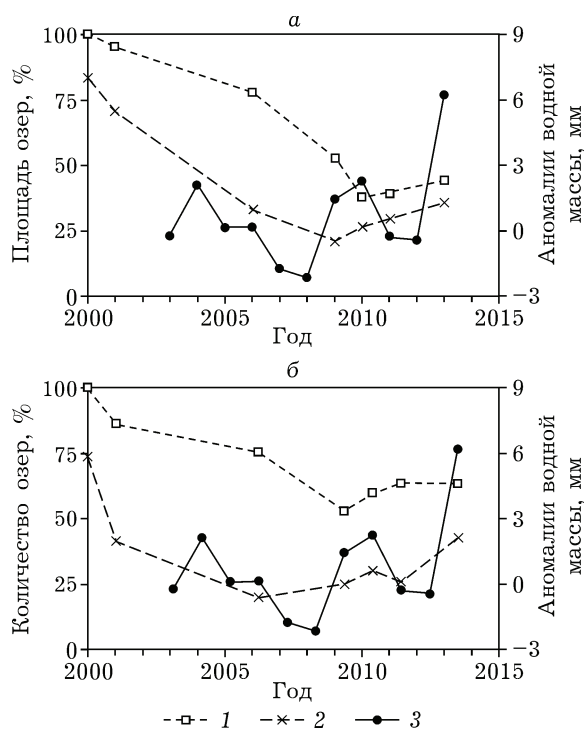


Рис. 7. Динамика площади и количества озер, аномалий водного эквивалента массы. 1 – большие озера (% от максимального значения), 2 – малые озера (% от максимального значения), 3 – данные гравиметрии

пературой и осадками ( $R^2 = 0,84...0,97$ ). При этом максимальная величина корреляции наблюдается с усредненными метеопараметрами текущего и предшествующих лет. Этот кумулятивный эффект связан, очевидно, с продолжительностью засухи. В экстремально засушливые периоды (2006–2010 гг.) наблюдалось четырехкратное сокращение количества озер (с 1060 в 1989 г. до 240 в 2006 г.) и трехкратное – площади озер (по сравнению с максимумом в 2000 г.). Аналогичные явления (уменьшение числа озер и площади водных поверхностей), которые связывают с изменениями климата, отмечались и в других регионах Центральной Азии, а также на Тибетском плато [Huang et al., 2011; Liao et al., 2013; Song et al., 2013; Yang, Lu, 2014].

Анализ материалов съемки со спутника GRACE показал ее применимость и перспективность в мониторинге водного режима территорий. Между данными гравиметрии и количеством озер наблюдается высокий уровень

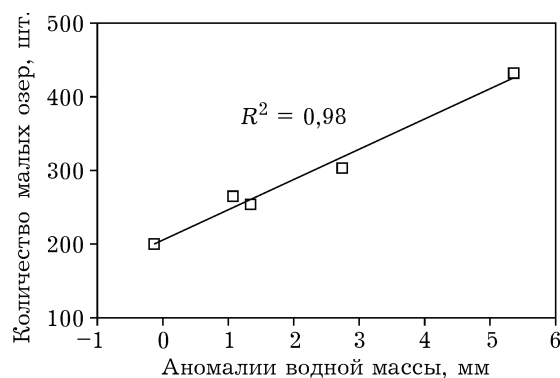


Рис. 8. Связь количества малых озер с аномалиями водного эквивалента массы

корреляции ( $r = 0,99$ ). При этом существует временная задержка между данными GRACE и актуальной площадью озер. Последнее обусловлено, вероятно, опережающим насыщением почвогрунтов влагой, чему способствует высокий уровень дренажа в исследуемом регионе, тогда как величина водной поверхности более инертна и восстанавливается с запозданием.

Возрастание засушливости в Забайкалье, сказываясь на водных ресурсах, влечет ухудшение состояния древостоев. Так, одновременно с уменьшением числа и количества озер в период с 2003 по 2008 г. в лесостепи Забайкалья наблюдалось усыхание березняков [Kharuk et al., 2013b]. В этом же временном интервале на юге Сибири происходило усыхание древостоев, сформированных пихтой (*Abies sibirica*) и кедром (*Pinus sibirica*), индуцированное периодическими засухами [Kharuk et al., 2013a]. Имеющиеся данные указывают на высокую вероятность исчезновения кедра и пихты из части их ареала в случае сохранения существующих климатических трендов.

В последнее столетие происходили многократные изменения уровня и количества озер Забайкалья. Анализ многолетней динамики позволил выявить цикличность в этом процессе с величиной периода около 29 лет. Таким образом, прогнозируемый минимум количества и уровня водной поверхности озер следует ждать в 2033–2035 гг. При этом ожидаемые изменения числа, уровня и площади озер могут превосходить ранее наблюдавшиеся, поскольку климатические сценарии предсказывают усиление аридности климата на

юге Центральной Сибири, возрастание частоты и интенсивности засух [IPCC, 2014]. Последнее может привести также к сокращению вышеуказанного периода цикличности озер и повлечь значительное уменьшение водных ресурсов в регионе Забайкалья.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе данных дистанционного зондирования и климатических данных показано, что динамика водной поверхности озер Забайкалья тесно связана с климатическими переменными (с осадками  $r^2 = 0,84-0,85$ ; с температурами  $r^2 = -0,77...-0,9$ ; с индексом сухости  $r^2 = 0,95...0,97$ ). В экстремально засушливые периоды наблюдалось четырехкратное сокращение количества озер (в 2006 г. по сравнению с 1989 г.) и трехкратное – их площади (в 2010 г. по сравнению с 2000 г.).

Между данными гравиметрии и количеством озер наблюдается высокий уровень корреляции ( $r = 0,99$ ). При этом существует временная задержка между данными GRACE и актуальной площадью озер, обусловленной, вероятно, опережающим насыщением почвогрунтов влагой.

Анализ многолетней динамики озер позволил выявить цикличность в этом процессе с величиной периода около 29 лет. Прогнозируемый минимум количества и уровня водной поверхности следует ожидать в 2033–2035 гг.

Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 14-24-00112. Анализ данных гравиметрической съемки GRACE поддержан грантом Правительства РФ № 14.B.25.31.0031.

### ЛИТЕРАТУРА

- Баженова О. И. Внутривековая организация систем экзогенного рельефообразования в степях Центральной Азии // География и прир. ресурсы. 2007. № 3. С. 116–125.
- Корнутова Е. И. История развития Торейских озер Восточного Забайкалья // Мезозойские и кайнозойские озера Сибири. М.: Наука, 1968. С. 74–88.
- Кравцова В. И., Тарасенко Т. В. Динамика термокарстовых озер центральной Якутии при изменениях климата с 1950 года // Криосфера Земли. 2011. Т. XV, № 3. С. 31–42.
- Обязов В. А. Связь колебаний водности озер степной зоны Забайкалья с многолетними гидрометеорологическими изменениями на примере Торейских озер // Изв. Русск. геогр. о-ва. 1994. Т. 126, вып. 5. С. 48–54.
- Обязов В. А., Смахтин В. К. Многолетний режим стока рек Забайкалья: Анализ и фоновый прогноз // Водное хоз-во России. 2012. № 1. С. 63–72.
- Birkett C., Reynolds C., Beckley B., Doorn B. From Research to Operations: The USDA Global Reservoir and Lake Monitor // Coastal Altimetry / eds. S. Vignudelli, A. G. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste. Berlin; Heidelberg: Springer, 2011. 596 p. (<http://link.springer.com/book/10.1007/978-3-642-12796-0>). P. 19–50.
- Harris I., Jones P. D., Osborn T. J., Lister D. H. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset Issue // Int. Journ. Climatol. 2014. Vol. 34, N 3. P. 623–642.
- Huang L., Liu J., Shao Q., Liu R. Changing inland lakes responding to climate warming in Northeastern Tibetan Plateau // Climatic Change. 2011. Vol. 109. P. 479–502. DOI:10.1007/s10584-011-0032-x
- IPCC. IPCC Fifth Assessment Synthesis Report. 2014. 40 p. [http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR\\_AR5\\_SPM.pdf](http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/SYR_AR5_SPM.pdf)
- Jepsen S. M., Voss C. I., Walvoord M. A., Minsley B. J., Rover J. Linkages between lake shrinkage/expansion and sublacustrine permafrost distribution determined from remote sensing of interior Alaska, USA // Geophys. Res. Lett. 2013. Vol. 40. P. 882–887. DOI:10.1002/grl.50187.
- Karlsson J. M., Lyon S. W., Destouni G. Temporal Behavior of Lake Size-Distribution in a Thawing Permafrost Landscape in Northwestern Siberia // Remote Sens. 2014. Vol. 6. P. 621–636. DOI:10.3390/rs6010621
- Kharuk V. I., Im S. T., Oskorbin P. A., Petrov I. A., Ranson K. J. Siberian Pine Decline and Mortality in Southern Siberian Mountains // Forest Ecol. Manage. 2013a. Vol. 310. P. 312–320.
- Kharuk V. I., Ranson K. J., Oskorbin P. A., Im S. T., Dvinskaya M. L. Climate induced birch mortality in trans-Baikal lake region, Siberia // Ibid. 2013b. V. 289. P. 385–392.
- Landerer F. W., Swenson S. C. Accuracy of scaled GRACE terrestrial water storage estimates // Water Resources Research. 2012. Vol. 48(4). DOI:10.1029/2011WR011453
- Liao J., Shena G., Li Y. Lake variations in response to climate change in the Tibetan Plateau in the past 40 years // Int. Journ. Digital Earth. 2013. Vol. 6, N. 6. P. 534–549. DOI:10.1080/17538947.2012.656290
- Riordan B., Verbyla D., McGuire A.D. Shrinking ponds in subarctic Alaska based on 1950–2002 remotely sensed images // J. Geophys. Res. 2006. Vol. 111. G04002. DOI:10.1029/2005JG000150
- Roach J. K., Griffith B., Verbyla D. Landscape influences on climate-related lake shrinkage at high latitudes // Global Change Biology. 2013. Vol. 19. P. 2276–2284. DOI: 10.1111/gcb.12196.
- Rover J., Ji L., Wylie B. K., Tieszen L. L. Establishing water body areal extent trends in interior Alaska from multi-temporal Landsat data // Remote Sens. Lett. 2012. Vol. 3. P. 595–604. DOI:10.1080/01431161.2011.643507.
- Smith L. C., Sheng Y., McDonald G. M., Hinzman L. D. Disappearing Arctic Lakes // Science. 2005. Vol. 308. P. 1429.



Song C., Huang B., Ke L. Modeling and analysis of lake water storage changes on the Tibetan Plateau using multi-mission satellite data // *Remote Sensing of Environment*. 2013. Vol. 135. P. 25–35.

Tangdamrongsub N., Hwang C., Kao Y-C. Water storage loss in central and south Asia from GRACE satellite gravity: correlations with climate data // *Nat Hazards*. 2011. Vol. 59. P. 749–769. DOI:10.1007/s11069-011-9793-9.

Vicente-Serrano S. M., Santiago B., Juan I. L-M. A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI // *J. Climate*. 2010. Vol. 23. P. 1696–1718.

Yang X., Lu X. Drastic change in China's lakes and reservoirs over the past decades // *Scientific reports*. 2014. Vol. 4. P. 6041. DOI:10.1038/srep06041.

## Climate-Induced Lake Dynamics in the Trans-Baikal Forest-Steppe Ecotone

S. T. IM<sup>1,2,3</sup>, V. I. KHARUK<sup>1,2</sup>, N. M. RAKITYANSKAYA<sup>2</sup>, A. S. GOLYUKOV<sup>2</sup>

<sup>1</sup> *V. N. Sukachev Institute of Forest, SB RAS  
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28*

<sup>2</sup> *Siberian Federal University  
660041, Krasnoyarsk, Svobodnii ave., 79*

<sup>3</sup> *M. F. Reshetnev Siberian State Aerospace University  
660014, Krasnoyarsk, Krasnoyarskii rabochii ave., 31  
E-mails: stim@ksc.krasn.ru, kharuk@ksc.krasn.ru*

Quantitative dynamics, water surface area, and water level of lakes in the Trans-Baikal forest-steppe zone were studied by means of spectroradiometry (Landsat satellite), gravimetry (GRACE satellite) and altimetry (Envisat satellite). The number of lakes and their water surface area correlated with precipitation ( $r^2 = 0.84-0.85$ ), summer and annual temperature ( $r^2 = -0.77...-0.9$ ) and drought index ( $r^2 = 0.95...0.97$ ). During extremely dry periods (2006–2010) the number of lakes decreased by four (compared to 1989) and their water surface area decreased by three (compared to 2000) were observed. The rate of change in the water level of the lakes (~29 years) was determined.

**Key words:** lake dynamics, Trans-Baikal forest-steppe, Landsat, GRACE, altimetry, SPEI.