Исследование динамики площадей водной поверхности озёр степной зоны Восточного Забайкалья на основе данных дистанционного зондирования Земли

М.А. Кашницкая

Научно-исследовательский центр космической гидрометеорологии «Планета» Москва, 123242, Россия E-mail: Marina-Sosnina1993@yandex.ru

На основе данных космических аппаратов серии Landsat проведён анализ многолетней динамики суммарной площади водной поверхности озёр степной зоны Восточного Забайкалья за период с 1989 по 2020 г. Выявлены годы с максимальными и минимальными значениями суммарной площади водной поверхности озёр исследуемого региона. Для детального анализа динамики площади водной поверхности озёр рассмотрено 23 наиболее изученных озера на исследуемой территории. В результате кластеризации площади водной поверхности этих озёр методом *k*-средних получены три группы озёр. По теоретическому описанию и географическому расположению водоёмов исследуемые озёра классифицированы в зависимости от условий происхождения: водоёмы тектонического, старичного и эрозионно-тектонического типов. По результатам корреляционного анализа установлено, что озёра старичного типа и эрозионно-тектонического происхождения наиболее точно отражают уровень увлажнённости региона. Водоёмы тектонического происхождения также могут отражать уровень увлажнённости региона, но реагируют на изменения увлажнения с некоторым запаздыванием.

Ключевые слова: озёра степной зоны, спектральные индексы, кластеризация, MNDWI, Landsat, «Канопус-В», Восточное Забайкалье

Одобрена к печати: 28.04.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-242-253

Введение

Большинство озёр степной зоны Восточного Забайкалья бессточные, не имеющие поверхностного или подземного стока. Водный расход бессточных озёр осуществляется за счёт испарения и инфильтрации. Поэтому изучение изменений этих озёр — хорошая фоновая оценка для анализа современных изменений природы и климата, а также уровня увлажнённости в региональном масштабе. Исследование таких водоёмов — одна из фундаментальных проблем геоэкологии (Голубев, 1999).

В настоящем исследовании на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) рассмотрены озёра, находящиеся на территориях с особым режимом использования, где хозяйственная деятельность запрещена либо существенно ограничена: Государственный природный биосферный заповедник «Даурский» и Государственный комплексный заказник регионального значения «Агинская степь». В связи с вышеизложенным на исследуемые озёра исключено антропогенное воздействие и их изменение происходит под влиянием природных условий.

Анализ динамики суммарной площади водной поверхности озёр степной зоны Восточного Забайкалья за период 1989—2016 гг. был выполнен автором настоящей работы ранее (Голятина и др., 2019), где были выявлены годы с максимальными и минимальными значениями количества и площади водной поверхности озёр. В работе (Вахнина и др., 2020) в результате корреляционного анализа установлена тесная связь изменения площади озёр с климатическими условиями исследуемой территории. Для бессточных озёр размер суммарной площади водного зеркала в текущем году — это результат характера их водности в предшествующие годы. При этом уменьшение размеров озера может иметь место и в многоводном году, если этому предшествовал ряд маловодных лет, а увеличение — в маловодном, если этот маловодный год наблюдается в пределах многоводного периода.

Однако при подробном рассмотрении многолетней динамики площади водной поверхности каждого озера по отдельности на исследуемой территории были отмечены различия в ходе изменения их водности, а именно — максимальные и минимальные значения площади озёр соответствуют разным периодам времени. В связи с этим цель настоящей работы заключалась в анализе динамики суммарной площади водной поверхности озёр степной зоны Восточного Забайкалья за период 1989—2020 гг. и выявлении причин, в результате которых происходят несинхронные изменения озёр, на примере 23 наиболее изученных водоёмов. Понимание причин, сформировавших текущее состояние озера, позволяет в дальнейшем планировать его рациональное использование и охрану.

Объект исследования

Озёра степной зоны Восточного Забайкалья расположены в Ульдза-Торейской бессточной области на границе с Монголией (Bazhenova et al., 2015). Средняя высота рельефа составляет 600–800 м. Озёра преимущественно бессточного типа питания, солоноватые или солёные, глубиной до 5 м. В периоды максимальной климатической водности их количество составляло 1245 (1992), в периоды минимальной — 124 (2016). Самые крупные озёра исследуемой территории — Барун-Торей и Зун-Торей. Их отличительная особенность — значительная амплитуда колебаний уровня. В засушливые годы озёра почти полностью пересыхают, во влажные периоды суммарная площадь их водной поверхности достигает 850–880 км².

Материалы и методы исследования

Ввиду отсутствия режимных гидрологических наблюдений за озёрами степной зоны Восточного Забайкалья объективным и независимым источником информации о происходящих на данной территории природных процессах становятся данные ДЗЗ, позволяющие определять морфометрические характеристики озёр, в том числе площадь водного зеркала.

Для определения границы «суша – вода» используют автоматизированные методы дешифрирования спутниковых изображений. В настоящий момент наиболее популярными методами дешифрирования водного зеркала становятся применение мультиспектральных водных индексов и тематическая классификация спутниковых изображений. Стоит отметить, что в последние годы проводится много исследований по выявлению водных объектов на основе спутниковых индексных изображений. Однако нет единого мнения о том, какой водный индекс наиболее точно определяет границу «суша – вода». (Катаев, Бекеров, 2017; Курганович, Носкова, 2015; Морозова, 2019; Шмакова, 2020). Поэтому в рамках настоящего исследования было проведено уточнение наиболее оптимального метода выявления водной поверхности для исследуемой территории.

Для выбора оптимального метода дешифрирования водных объектов Восточного Забайкалья протестированы следующие методы: классификация с обучением, классификация без обучения и спектральные водные индексы (парные индексы AWEI_{sh} и AWEI_{nsh} (Automated Water Extraction Index — автоматизированный индекс выделения воды, sh — shadow, nsh — no shadow), MNDWI (Modification of Normalised Difference Water Index — модифицированный нормализованный разностный водный индекс), NDWI (Normalized Difference Water Index — нормализованный разностный водный индекс), WRI (Water Ratio Index — водный индекс)) на примере оз. Ножий. Данные высокого пространственного разрешения (2,1 м/пиксель) российских космических аппаратов (КА) серии «Канопус-В», принятые и обработанные (прошедшие радиометрическую и геометрическую коррекции, ортотрансформирование в картографическую проекцию, комплексирование изображения из панхроматического и многоспектрального снимков) в Научно-исследовательском центре космической гидрометеорологии «Планета» (НИЦ «Планета»), являлись эталонными. Для территории оз. Ножий в летний период в базе данных НИЦ «Планета» имеется пять безоблачных спутниковых изображений за следующие даты: 05.08.2013, 11.08.2015, 02.05.2019, 13.06.2019, 02.09.2019. Для расчёта площади поверхности оз. Ножий спутниковые изображения КА серии «Канопус-В» были трансформированы в универсальную поперечную проекцию Меркатора, которая даёт минимальную погрешность в вычислении площадных объектов. Непосредственное вычисление площади озера выполнялось средствами программного обеспечения (ПО) ArcGIS методом визуального дешифрирования. Затем выбирались мультиспектральные данные КА серии Landsat за наиболее близкую дату к дате съёмки эталонных данных, которые также были трансформированы в универсальную поперечную проекцию Меркатора. Далее в ПО ArcGIS с помощью инструментов Image Classification и Spatial Analyst проводилось вычисление площади оз. Ножий рассматриваемыми методами дешифрирования спутниковых изображений.

Оценка точности дешифрирования спутниковых изображений различными методами проводилась с использованием величины погрешности измерений ΔS :

$$\Delta S = \frac{S_{i,\Im} - S_{i,\Pi}}{S_{i,\Im}} \times 100,\tag{1}$$

где $S_{i,a}$ — площадь озера, определённая по результатам дешифрирования спутниковых изображений Landsat с использованием водных индексов; $S_{i,3}$ — площадь озера, определённая по результатам визуального дешифрирования спутниковых изображений «Канопус-В» (эталонная).

В результате анализа полученных данных установлено, что все протестированные методы адекватно выделяют водную поверхность, а погрешность измеренных величин довольно низкая (до 2,23 %). Наименьшая погрешность выделения водной поверхности выявлена для методов классификации с обучением и спектральных индексов MNDWI, AWE_{Insh} (*maбл. 1*). Из протестированных методов наиболее оптимальным с точки зрения точности результата и временных затрат оказалось использование спектрального индекса MNDWI.

Метод дешифрирования	Площадь озера, км ²					
	05.08.2013	11.08.2015	02.05.2019	13.06.2019	02.09.2019	Погрешность ΔS
Эталон	10,28	9,42	8,98	9,00	8,83	_
AWEI _{sh}	10,36	9,35	8,96	8,92	8,80	0,59
AWEI _{nsh}	10,54	9,63	9,28	9,16	9,01	0,92
NDWI	10,54	9,61	9,24	9,15	9,02	2,23
MNDWI	10,37	9,33	8,99	8,99	8,54	1,07
WRI	10,43	9,47	9,16	9,05	8,77	1,03
Классификация без обучения	9,37	10,51	9,13	9,15	8,91	1,37
» с обучением	9,50	10,17	9,16	9,00	8,75	0,98

Таблица 1. Площадь водной поверхности оз. Ножий, полученная различными методами дешифрирования спутниковых изображений KA серии Landsat

Для исследования многолетней динамики суммарной площади водного зеркала озёр степной зоны Восточного Забайкалья использованы данные КА серии Landsat за период 1989–2020 гг. Выбор обусловлен в первую очередь доступностью долговременного однородного ряда данных. В настоящий момент информация с КА серии Landsat — практически безальтернативный вариант изучения изменений, происходивших в последние десятилетия на поверхности Земли, в частности водных объектов. Кроме того, данные Landsat характеризуются относительно высоким пространственным разрешением в 30 м, что обеспечивает достоверное определение площади водного зеркала озера. Для исключения влияния сезонной изменчивости озёр при выборе спутниковых изображений тщательно отслеживалось, чтобы озёра соответствовали условиям летнего меженого периода. Всего обработано и проанализировано 32 спутниковых изображения.

Подбор спутниковых изображений и их первоначальная обработка, включая вычисление индекса MNDWI, проводились в веб-сервисе Bera-Science (http://sci-vega.ru/), который является составной частью Цента коллективного пользования ИКИ-Мониторинг (Лупян и др., 2015, 2019). Для дальнейшего расчёта площади водной поверхности озёр использовалось ПО ArcGIS, где осуществлялось преобразование растровых индексных изображений в векторный формат.

Обсуждение результатов

Анализ динамики суммарной площади водной поверхности озёр степной зоны Восточного Забайкалья за период 1989—2016 гг. был выполнен ранее, с результатами можно ознакомиться в работах (Вахнина и др., 2020; Голятина и др., 2019). После продолжения ряда данных до 2020 г. тенденции изменений количества озёр и площади их водной поверхности не изменились. Минимальные значения количества и суммарной площади водной поверхности не изисследуемых озёр за период 1989—2020 гг. отмечаются в 2016 г. С 2017 г. наблюдается увеличение количества озёр. Суммарная площадь водного зеркала озёр после 2016 г. (период минимальной водности за исследуемый период) достигала отметки 578,8 км² в 2017 г., а уже в 2019 г. уменьшилась на 43,9 % (*puc. 1*). Это объясняется динамикой водного режима крупных озёр территории — Барун-Торей и Зун-Торей, так как они составляют существенную (около 80 %) часть суммарной площади водной поверхности озёр исследуемой территории. С 2016 г. отмечается уменьшение площади оз. Зун-Торей, в то время как площадь оз. Барун-Торей постепенно увеличивается (*puc. 2*, см. с. 246).





Для выявления причин, по которым происходят изменения размеров озёр на исследуемой территории, проанализирована динамика площади водной поверхности 23 озёр по отдельности (*табл. 2*). Выбранные озёра находятся на значительном расстоянии друг от друга, но, согласно исследованиям, входят в состав одной озёрной системы (Локоть и др., 1991). А также каждое озеро представляет интерес для гидрохимических исследований (Локоть и др., 1991; Ташлыкова, Афонина, 2019).



Рис. 2. Карты-схемы водной поверхности озёр Барун-Торей и Зун-Торей за 2000, 2016—2020 гг., полученные в результате дешифрирования спутниковых изображений КА серии Landsat

Озеро	Максимальная площадь, км ² (год)	Минимальная площадь, км ² (год)	Средняя площадь, км ²	Стандартное отклонение, км ²
Цаган-Торум	0,67 (1992)	0 (2006, 2009)	0,27	0,23
Бабье	0,50 (1992)	0 (2003)	0,28	0,13
Большая Булугунда	0,49 (1999)	0 (2016)	0,30	0,14
Барун-Шывыртуй	0,54 (1992)	0,04 (2011)	0,35	0,11
Хараганаш	0,70 (1992)	0 (2012, 2016, 2017)	0,42	0,25
Бильчир-Нур	0,81 (1999)	0 (2016)	0,52	0,26
Ганга-Нур	1,32 (1992)	0 (2006, 2019)	0,89	0,33
Шихалин-Нур	2,09 (1989)	0,19 (2005)	0,89	0,51
Шварцивское	1,48 (1999)	0,45 (2019)	1,02	0,32
Борзинское	1,32 (1992)	0,84 (2005)	1,08	0,11
Гашкой	2,58 (1999)	0,01 (2016)	1,69	0,70
Хоточей	2,84 (1999)	0,31 (2016)	2,01	0,60
Балыктуй	2,58 (1999)	1,30 (2019)	2,13	0,35
Укшинда	3,49 (2001)	1,84 (2019)	2,70	0,42
Ару-Торум	3,96 (1999)	0,80 (2019)	2,92	0,84
Баин-Цаган	3,55 (2002)	2,39 (2019)	3,05	0,33
Улин	6,25 (1994)	1,23 (2017)	4,30	1,64
Цаган-Нур (Урта-Харгана)	6,61 (1999)	2,92 (2019)	5,29	0,72
Цаган-Нур (Новый Дурлугуй)	7,81 (1999)	3,75 (2018)	6,00	1,04
Кункур	9,61 (1999)	0,76 (2016)	6,77	2,87

Таблица 2. Информация о площади водной поверхности 23 исследуемых озёр степной зоны Восточного Забайкалья, рассчитанной по данным KA серии Landsat

Озеро	Максимальная площадь, км ² (год)	Минимальная площадь, км ² (год)	Средняя площадь, км ²	Стандартное отклонение, км ²
Ножий	20,86 (1992)	8,63 (2017)	15,24	4,45
Зун-Торей	301,63 (1999)	86,92 (2018)	275,27	44,68
Барун-Торей	557,79 (1999)	0 (2009)	352,10	196,44

Окончание табл. 1

На основе методов машинного обучения и статистического анализа данных озера были классифицированы на группы по характеру изменения площади водной поверхности для выявления закономерностей, влияющих на динамику их водности. Ввиду того, что значения площади водной поверхности исследуемых озёр значительно разнятся, для статистически точного результата они были нормированы по формуле:

$$M = \left\{ S_{[year]} = \frac{S_{[yaer]} - mean}{std}; year = 1990, 1991, \dots, 2019 \right\},$$
(2)

где M — множество анализируемых значений конкретного озера после нормирования; $S_{[year]}$ — площадь озера в год *year*; *mean* — среднее арифметическое значение площади озера за все годы; *std* — стандартное отклонение площади озера по ряду всех лет.

Такое нормирование было необходимым условием для разделения озёр по характеру их изменений без учёта абсолютных значений площади водной поверхности озёр.

Классифицирование озёр на группы проводилось методом кластеризации без обучения — методом *k*-средних. По результатам экспертной оценки было подобрано наиболее оптимальное число кластеров, равное трём, что хорошо согласуется с теоретическими представлениями о возможных существующих группах озёр. Однако озёра Зун-Торей и Барун-Торей были исключены из рассмотрения, так как они имеют поверхностный сток и динамика площади их водной поверхности тесно связана с изменением этого стока (Обязов, 1994). Графики динамики площади водной поверхности озёр каждой группы приведены на *рис. 3* (см. с. 248). В первую группу вошли следующие озёра: Гашкой, Хоточей, Балыктуй, Укшинда, Ару-Торум, Баин-Цаган, Цаган-Нур (Урта-Харгана), Цаган-Нур (Новый Дурлугуй). Во вторую: Цаган-Торум, Бабье, Ганга-Нур, Шихалин-Нур, Борзинское. В третью: Большая Булугунда, Барун-Шывыртуй, Хараганаш, Бильчир-Нур, Шварцивское, Улин, Кункур, Ножий.

Полученные в результате кластеризации группы озёр (кластеры) хорошо согласуются с группами озёр, рассмотренными в монографии (Локоть и др., 1991), классифицированными в зависимости от типа происхождения, и характеризуются следующими особенностями:

1. Озёра, входящие в состав первого кластера, относятся к водоёмам озёрного пояса тектонического происхождения. По спутниковым изображениям у озёр прослеживаются плавные очертания береговой линии, что соответствует их теоретическому описанию. За наблюдаемый период площади озёр увеличивались в среднем до 2000–2001 гг., а затем плавно уменьшались до 2019 г. Минимальные значения площади для этой группы у мелких озёр (площадь до 0,5 км²) наблюдались в 2016 г., у остальных озёр — в 2019 г.

2. Озёра второго кластера в зависимости от происхождения относятся к группе озёр старичного типа. На динамику площади их водной поверхности существенное влияние оказывает наполняемость рек, старицами которых они являются. Для этих озёр характерно максимальное наполнение в 1989—1992 гг., минимальные значения площади водной поверхности отмечались в 2003—2006 гг., после наблюдается наполнение озёр.

3. Озёра третьего кластера, сформированные в результате эрозионно-тектонических процессов, часто неглубокие. Имеют подземное питание, что позволяет им сохранять свои размеры длительное время. Вследствие эрозионной составляющей в происхождении эти озёра характеризуются непостоянством формы береговых линий. Такие озёра до начала 2000 г. были стабильны, изменения площади водной поверхности проходили плавно; после 2000–2003 гг. озёра начали уменьшаться, достигнув минимума в 2016–2017 гг., некоторые даже высыхали.



Рис. 3. Динамика площади водной поверхности озёр в каждом кластере, полученном в результате необучаемой кластеризации методом *k*-средних



На рис. 4 представлено пространственное распределение озёр по выявленным кластерам.

Рис. 4. Пространственное распределение озёр по выявленным кластерам. 1 — Ару-Торум; 2 — Бабье; 3 — Баин-Цаган; 4 — Балыктуй; 5 — Барун-Торей; 6 — Барун-Шивертуй; 7 — Бильчир-Нур; 8 — Большая Булугунда; 9 — Борзинское; 10 — Ганга-Нур; 11 — Гашкой; 12 — Зун-Торей; 13 — Кункур; 14 — Ножий; 15 — Укшинда; 16 — Улин; 17 — Хараганаш; 18 — Хоточей; 19 — Цаган-Нур (Новый Дурулгуй); 20 — Цаган-Нур (Урта-Харгана); 21 — Цаган-Торум; 22 — Шварцивское; 23 — Шихалин-Нур

Динамика площади водной поверхности озёр внутри выделенных кластеров хорошо согласуется, значение парного коэффициента корреляции *r* составляет в среднем 0,9 для каждого кластера.

Поскольку изучаемые озёра имеют тесную связь с климатическими изменениями, было проведено сопоставление динамики площади водной поверхности озёр каждого кластера с многолетними изменениями суммы осадков тёплого периода (май – сентябрь) за 1957—2019 гг. как наиболее значимым климатическим параметром (Вахнина и др., 2020). В результате корреляционного анализа данных выявлено, что динамика площади водной поверхности озёр старичного и эрозионно-тектонического типов происхождения хорошо согласованы с многолетними колебаниями атмосферных осадков, осреднёнными за 11-летний период (*рис. 5*, см. с. 250). Коэффициент корреляции *г* для каждого кластера составляет: 0,3 — для водоёмов озёрного пояса; 0,8 — для озёр старичного типа; 0,7 — для озёр эрозионно-тектонического происхождения.

Заключение

Минимальная водность озёр степной зоны Восточного Забайкалья за исследуемый период отмечалась в 2016 г., затем в 2017—2018 гг. наблюдалось увеличение количества озёр и суммарной площади их водной поверхности; в 2019 г. вновь произошло уменьшение значений изучаемых параметров. В 2020 г. наблюдается возрастание количества озёр на 87,7 % по отношению к 2019 г., в то время как суммарная площадь водной поверхности озёр увеличилась на 16,3 %.



Рис. 5. Многолетние нормированные сглаженные значения площадей водной поверхности озёр старичного типа (*a*) и эрозионно-тектонического происхождения (б) степной зоны Восточного Забайкалья. Красная линия — многолетние изменения сумм осадков тёплого периода (май – сентябрь), сглаженные 11-летним скользящим осреднением

На динамику суммарной площади водной поверхности озёр существенное влияние оказывает изменение водности озёр Барун-Торей и Зун-Торей. За последние пять лет оз. Барун-Торей, с момента полного высыхания в 2016 г., постепенно восстанавливается, увеличение площади водной поверхности отмечается каждый год. Площадь водной поверхности оз. Зун-Торей с 2016 г. уменьшалась, наименьшее значение отмечалось в 2019 г. (23,3 км²).

На основе критериев пространственного расположения и изученности выделены 23 озера, наиболее характеризующие степную зону Восточного Забайкалья. Детально проанализирована многолетняя динамика площади их водной поверхности. В результате классификации методом кластерного анализа исследуемые озёра были соотнесены по трём группам в зависимости от характера динамики площади водной поверхности. Выявленные группы озёр хорошо согласуются с классификацией озёр степной зоны Восточного Забайкалья по условиям их происхождения, а также с теоретическими описаниями водоёмов.

Наиболее точно текущее состояние увлажнённости региона отражают озёра старичного и эрозионно-тектонического типов происхождения. В то время как водоёмы озёрного пояса тектонического происхождения в целом способны отразить ситуацию увлажнения в регионе, но из-за запасов воды в озере и, вероятно, типа питания реагируют на изменения увлажнения в регионе с запаздыванием.

Таким образом, основываясь на исследовании динамики площади водной поверхности бессточных озёр аридной природной зоны, полученной в результате тематической обработки спутниковых данных, можно определить уровень увлажнённости территории исследования. А также при наличии теоретической информации о подстилающей поверхности для территории рассматриваемых озёр можно выявить причины изменения их водности, в том числе определить условия формирования водоёмов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 19-14-00028).

Литература

- 1. Вахнина И.Л., Носкова Е.В., Голятина М.А. Особенности изменения площадей водного зеркала и количества озер степной зоны Восточного Забайкалья // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Сер.: География. Геоэкология. 2020. № 3. С. 13–23. DOI: 10.17308/geo.2020.3/3019.
- 2. *Голубев Г. Н.* Геоэкология: учебник для студентов высших учебных заведений. М.: Изд-во ГЕОС, 1999. 338 с.
- Голятина М.А., Вахнина И.Л., Носкова Е.В. Анализ динамики озер Даурской степи в условиях изменения климата с применением данных ДЗЗ // Материалы Семнадцатой Всероссийской открытой конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». 11–15 нояб. 2019. М.: ИКИ РАН, 2019. С. 80. DOI: 10.21046/17DZZconf-2019а.
- 4. *Катаев М. Ю., Бекеров А.А.* Методика обнаружения водных объектов по многоспектральным спутниковым измерениям // Докл. Томского гос. ун-та систем управления и радиоэлектроники. 2017. Т. 20. № 4. С. 105–108. DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-105-108.
- 5. *Курганович К.А., Носкова Е.В.* Использование водных индексов для оценки изменения площадей водного зеркала степных содовых озер юго-востока Забайкалья, по данным дистанционного зондирования // Вестн. Забайкальского гос. ун-та. 2015. № 6(121). С. 16–24.
- 6. Локоть Л. И., Стрижова Т.А., Горлачёва Е. П., Шамсутдинов В.Х., Чечель А. П., Тополов А.А., Итигилова М.Ц., Клишко О.К., Оглы З. П., Балушкина Е.В., Серебрякова М.С., Орлик Л.А., Афонин А.В. Содовые озера Забайкалья. Экология и продуктивность. Новосибирск: Наука, 1991. 216 с.
- 7. Лупян Е.А., Бурцев М.А., Балашов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашницкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
- Лупян Е.А., Прошин А.А., Бурцев М.А., Кашницкий А.В., Балашов И.В., Барталев С.А., Константинова А.М., Кобец Д.А., Мазуров А.А., Марченков В.В., Матвеев А.М., Радченко М.В., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Опыт эксплуатации и развития центра коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных (ЦКП «ИКИ-Мониторинг») // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 3. С. 151–170. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- 9. *Морозова В.А.* Расчет индексов для выявления и анализа характеристик водных объектов с помощью данных дистанционного зондирования // Современные проблемы территориального развития. 2019. № 2. 9 с.
- Обязов В.А. Связь колебаний водности озер степной зоны Забайкалья с многолетними гидрометеорологическими изменениями на примере Торейских озер // Изв. Русского географ. об-ва. 1994. Вып. 5. С. 48–54.
- 11. Ташлыкова Н.А., Афонина Е.Ю. Современный видовой состав и эколого-географическая характеристика планктонных сообществ литоральной зоны некоторых озер Улдза-Торейского бассейна (Забайкальский край) // Acta Biologica Sibirica. 2019. Т. 5. № 2. С. 102–110. DOI: 10.14258/abs. v5.i2.6163.

- 12. Шмакова В. Ю. Сравнение морфометрических характеристик озёр для различных водных индексов // 17-я Конф. молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования»: сб. тр. Сер. «Механика, управление, информатика». 30 сент. 2020. М.: ИКИ РАН, 2020. С. 161–169.
- 13. Bazhenova O. I., Kobylkin D. V., Makarov S. A., Silaev A. V., Cherkashina A. A., Rogaleva N. N. Reconstructing the aeolian processes in Daurian steppes during arid phases of morphogenesis // Geography and Natural Resources. 2015. V. 36. P. 289–299. DOI: 10.1134/S1875372815030099.

The dynamics of the water surface areas of steppe lakes in the Eastern Transbaikalia region using satellite data

M.A. Kashnitskaya

State Research Center for Space Hydrometeorology "Planeta", Moscow 123242, Russia E-mail: Marina-Sosnina1993@yandex.ru

The analysis of the long-term dynamics of the total area of the water surface of the steppe lakes in the Eastern Transbaikalia region for the period from 1989 to 2020 was carried out using Landsat satellite data. The years with the maximum and minimum values of the total area of the lakes water surface have been identified. For further detailed analysis of their dynamics, the most studied 23 lakes in the region were chosen. Three groups of lakes were identified as a result of clustering the water surface areas of these lakes using the k-means algorithm. According to the theoretical description and the geographical location of the water bodies, it has been established that the studied lakes are classified based on their origin: tectonic, oxbow and erosion-tectonic origin. The correlation analysis showed that the lakes of the oxbow and erosion-tectonic origin display more accurately the level of moisture in the region. The lakes of the tectonic origin can also show the level of moisture in the region, but they react to its changes with some time-lag.

Keywords: steppe zone lakes, spectral indices, clustering, MNDWI, Landsat, Kanopus-V, Eastern Transbaikalia region

Accepted: 28.04.2021 DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-242-253

References

- 1. Vakhnina I. L., Noskova E. V., Golyatina M. A., Features of change in area of a water mirror and the number of lakes in the steppe zone of Eastern Transbaikalia, *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta*. *Ser.: Geografiya*. *Geoekologiya*, 2020, No. 3, pp. 13–23 (in Russian), DOI: 10.17308/geo.2020.3/3019.
- 2. Golubev G. N., *Geoekologiya: uchebnik dlya studentov vysshikh uchebnykh zavedenii* (Geoecology. Textbook for students of higher educational institutions), Moscow: GEOS, 1999, 338 p. (in Russian).
- Golyatina M. A., Vakhnina I. L., Noskova E. V., Analysis of the dynamics of the lakes of the Daurskaya steppe under the conditions of climate change using remote sensing data, *Materialy Semnadtsatoi Vseros*siiskoi otkrytoi konferentsii "Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa" (Proc. 17th Open Conf. "Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space"), 11–15 Nov. 2019, Moscow: IKI RAN, 2019, p. 80 (in Russian), DOI: 10.21046/17DZZconf-2019a.
- 4. Kataev M. Yu., Bekerov A. A., Methodology of the water objects detection from multi-spectrum satellite measurements, *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki*, 2017, Vol. 20, No. 4, pp. 105–108 (in Russian), DOI: 10.21293/1818-0442-2017-20-4-105-108.
- 5. Kurganovich K.A., Noskova E.V., The estimation of water surface variations of steppe soda lakes in the southeast of Transbaikalie with using of remote sensing of water indices, *Vestnik Zabaikal'skogo gosudarst-vennogo universiteta*, 2015, No. 6(121), pp. 16–24 (in Russian).
- Lokot' L. I., Strizhova T. A., Gorlacheva E. P., Shamsutdinov V. Kh., Chechel' A. P., Topolov A. A., Itigilova M. Ts., Klishko O. K., Ogly Z. P., Balushkina E. V., Serebryakova M. S., Orlik L. A., Afonin A. V., Sodovye ozera Zabaikal'ya. Ekologiya i produktivnost' (Natron lakes. Ecology and productivity), Novosibirsk: Nauka, 1991, 216 p. (in Russian).

- Loupian E.A., Burtsev M.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Efremov V.Yu., Kashnitskiy A.V., Mazurov A.A., Matveev A.M., Sudneva O.A., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A., Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring), *Sovremennye problem distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284 (in Russian).
- Loupian E.A., Proshin A.A., Burtsev M.A., Kashnitskii A.V., Balashov I.V., Bartalev S.A., Konstantinova A.M., Kobets D.A., Mazurov A.A., Marchenkov V.V., Matveev A.M., Radchenko M.V., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A., Experience of development and operation of the IKI-Monitoring center for collective use of systems for archiving, processing and analyzing satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 3, pp. 151–170 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-3-151-170.
- 9. Morozova V.A., Calculation of indices for the analysis of water objects according to remote sensing data, *Sovremennye problemy territorial'nogo razvitiya*, 2019, No. 2, 8 p. (in Russian).
- 10. Obyazov V.A., Relationship between fluctuations in the water content of lakes in the steppe zone of Transbaikalia with long-term hydrometeorological changes on the example of Torey lakes, *Izvestiya Russkogo geograficheskogo obshchestva*, 1994, No. 5, pp. 48–54 (in Russian).
- 11. Tashlykova N.A., Afonina E.Yu., The current species composition and ecological-geographical characteristics of plankton communities in the littoral zone of some lakes of the Uldza-Torey basin (Trans-Baikal Territory), *Acta Biologica Sibirica*, 2019, Vol. 5, No. 2, pp. 102–110 (in Russian), DOI: 10.14258/abs. v5.i2.6163.
- Shmakova V. Yu., Comparison of the morphometric characteristics of lakes for different water indices, *"Fundamental'nye i prikladnye kosmicheskie issledovaniya"*, Ser. "Mekhanika, upravlenie, informatika" (Basic and applied space research, Ser. "Mechanics, Management, Informatics"), Proc. 17th Conf. Young Scientists, Moscow, 30 Sept. 2020, Moscow: IKI RAN, 2020, pp. 161–169 (in Russian).
- 13. Bazhenova O. I., Kobylkin D. V., Makarov S. A., Silaev A. V., Cherkashina A. A., Rogaleva N. N., Reconstructing the aeolian processes in Daurian steppes during arid phases of morphogenesis, *Geography and Natural Resources*, 2015, Vol. 36, pp. 289–299, DOI: 10.1134/S1875372815030099.