

## ПРОБЛЕМЫ ДЕГРАДАЦИИ ЗЕМЕЛЬ И УСТОЙЧИВОГО ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ

УДК 504.455;528.88;551.583

### ДИНАМИКА ПЛОЩАДИ ОЗЕР В СТЕПНОЙ ЗОНЕ АЛТАЙСКОГО КРАЯ В УСЛОВИЯХ АНТРОПОГЕННОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ И КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ

© 2022 г. Д. В. Черных<sup>а</sup>, \*, Р. Ю. Бирюков<sup>а</sup>, Д. К. Першин<sup>а</sup>

<sup>а</sup>Институт водных и экологических проблем СО РАН, Барнаул, Россия

\*e-mail: chernykhd@mail.ru

Поступила в редакцию 09.07.2021 г.

После доработки 09.08.2021 г.

Принята к публикации 12.10.2021 г.

Неотъемлемым элементом степных равнин Алтайского края, в частности Кулундинской низменности, является наличие большого количества различных по площади реликтовых озер. На основе данных дистанционного зондирования (космические снимки Landsat и Sentinel-2) за период 1989–2020 гг. проведен анализ динамики площадей водоемов в двух бессточных озерных системах Кулундинской низменности – Кулундинской и Плотавской. Выявлено отсутствие выраженных тенденций к направленному сокращению площадей водоемов. Несмотря на наличие нескольких сильных засух за последние 30 лет, водоемы Кулундинской и Плотавской озерных систем не испытывали каких-либо чрезвычайно резких сокращений площадей водной поверхности. Для оценки продолжительности и интенсивности засушливых периодов в работе был использован индекс SPEI. Показано, что межгодовая динамика водоемов слабо зависит от колебаний метеорологических условий конкретного года. Статистически значимые взаимосвязи обнаружены только с длительными 24- и 36-месячными индексами засушливости SPEI, что в целом указывает на определенную устойчивость механизмов питания озерных систем в Кулунде. Несмотря на значительную разницу в площади водоемов и размерах водосборных бассейнов, Кулундинская и Плотавская озерные системы характеризуются высокой синхронностью межгодовых колебаний площадей водоемов. Относительный размах внутригодового варьирования внутри небольшой Плотавской озерной системы был существенно выше, чем в значительно большей Кулундинской системе. Определенная стабильность функционирования озерных систем Кулундинской равнины может быть связана с весьма умеренным антропогенным воздействием на питающие их водотоки в последние десятилетия: отсутствие масштабного забора воды и регулирования стока гидротехническими сооружениями.

*Ключевые слова:* озера, климатические изменения, индексы засушливости, данные дистанционного зондирования, степная зона, Кулунда, Алтайский край

DOI: 10.31857/S2587556622010046

#### ВВЕДЕНИЕ

Динамика озер и болот рассматривается в качестве возможного индикатора климатических изменений, особенно в условиях неустойчивого увлажнения. Если в гумидных регионах водно-болотные угодья, как правило, имеют достаточные ресурсы для поддержания относительно устойчивых уровней в течение года и в многолетнем режиме, то в семиаридных и аридных уровни воды подвержены значительным колебаниям: сезонным (в связи со значительным притоком воды во время весеннего снеготаяния и) и межгодовым (в зависимости от увлажненности года) (Hayashi et al., 2016).

Зависимость между динамикой уровней и климатическими изменениями ярче проявляется в пределах замкнутых озерных бассейнов, по отношению к которым предложен термин “географи-

чески изолированные ветланды” (geographically isolated wetlands) (Tiner, 2003). Такие водоемы встречаются во многих частях планеты: на Среднем Востоке, в Центральной Азии, в Северной Америке, в Австралии. В Северной Америке максимальная их концентрация наблюдается в так называемом регионе западных прерий (Prairie Pothole Region) – территории на севере Великих равнин (Leibowitz and Vining, 2003; Shaw et al., 2012).

В степной и лесостепной зонах Западной Сибири, где сосредоточено большое количество географически изолированных ветландов, наблюдается существенная неустойчивость климатических тенденций. Большинство исследований указывает на значимые положительные тренды в изменениях приземной температуры воздуха (Доклад ..., 2021;

Degefie et al., 2014; Groisman et al., 2014; Kharlamova, 2020; Sada et al., 2019; Shulgina et al., 2011). На основе данных климатического реанализа ERA Interim значения тренда оценивались в  $0.8\text{--}1.6^\circ\text{C}/10$  лет (Shulgina et al., 2011). Экстремальные температурные индексы также показывали тенденции к росту (Degefie et al., 2014). При этом тенденции в изменении осадков были не столь выражены. На большей части Сибири не наблюдалось изменений зимних осадков, тогда как летние осадки в Западной Сибири уменьшались значительно (Shulgina et al., 2011). Индексы, связанные с экстремальными осадками, оставались стабильными (Degefie et al., 2014). Однако некоторые исследования прогнозируют рост в регионе как зимних, так и осенних осадков (Sada et al., 2019). Подобная вариабельность климатических тенденций наряду с изменениями антропогенных воздействий, предположительно, могут способствовать увеличению амплитуд колебания уровня водоемов.

С 1990-х годов для мониторинга динамики озер и сопряженных с ними ландшафтов широко применяются данные дистанционного зондирования. Преимуществами дистанционных методов являются: оперативность получения количественных оценок, возможность получения информации о пространственном соотношении и взаимном расположении объектов, возможность периодической актуализации. Такой мониторинг считается важнейшим инструментом управления землепользованием и территориальным развитием (Prishchepov et al., 2012). Возможности дистанционных методов в отношении динамики аквальных ландшафтов были всесторонне рассмотрены и систематизированы в (Ozesmi and Bauer, 2002).

Современные обобщения в данной области исследований показывают, что динамика озер в семиаридных и аридных регионах регулируется сложным комплексом климатических и антропогенных факторов (Fang et al., 2018; Zhang et al., 2020). Однако единых тенденций не обнаруживается, так как в каждом конкретном случае факторы, характеризующие состояние атмосферы, преломляются местными ландшафтными условиями и спецификой хозяйственной деятельности (Argyilan and Forman, 2003; Lenters et al., 2005).

Целью данного исследования является характеристика динамики площади водной поверхности в степной зоне Алтайского края за период 1989–2020 гг. в условиях антропогенного воздействия и климатических изменений.

Задачи:

- выявление зависимости между многолетней динамикой площади водной поверхности на ключевых участках и динамикой засушливости;
- анализ синхронности/асинхронности в межгодовой динамике площади водной поверх-

ности крупной озерно-бассейновой системы и мелкой озерной системы;

- характеристика внутригодовой динамики площади водной поверхности в пределах ключевых участков.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

### *Территория исследования*

Район исследования находится на юге Западной Сибири, в пределах Кулундинской озерно-аллювиальной равнины, на границе сухой и засушливой степи. Территория Кулунды относится к области внутреннего стока, а особенности пространственно-временной организации ландшафтов тесно связаны с эволюцией озерных систем. Сформировавшиеся здесь к настоящему времени озерные и озерно-бассейновые системы являются наследием крупных озер, занимавших территорию Кулунды в прошлом (Булатов и др., 2005). Все современные озера Кулунды представляют собой типичные географически изолированные ветланды. При общности происхождения, вне зависимости от размеров, все они мелководны, что позволяет обоснованно проводить сравнительный анализ динамики их площадей.

В качестве полигонов исследования выбраны два ключевых участка в пределах одной из крупнейших озерно-бассейновых систем Кулунды – Кучукско-Кулундинской. Первый ключевой участок охватывает акваторию Кулундинского озера с низкими озерными террасами и дельту р. Кулунда. Второй участок, меньший по площади, занимает котловину с группой озер Плотавы (рис. 1).

### *Подбор и обработка данных дистанционного зондирования*

В качестве источника информации о динамике водной поверхности использовались космические снимки Landsat, достоинства которых определяются их спектральным, пространственным и временным охватом и разрешающей способностью, а также свободным доступом к соответствующей базе данных (Mikkola, 1996; Walker and Acevedo, 1987). Кроме этого, для последних четырех лет анализа привлечены космические снимки Sentinel-2. Их применение позволило не нарушать ряд анализируемых временных срезов, для которых данные Landsat были некондиционны; кроме того, использование данных двух типов позволило повысить точность классификации. Получение данных осуществлялось через Web-портал EarthExplorer Геологической службы США (USGS).

Анализируемый период включает 1989–2020 гг. При подборе данных ДЗЗ выбирались безоблачные либо с низким процентом облачности сцены,

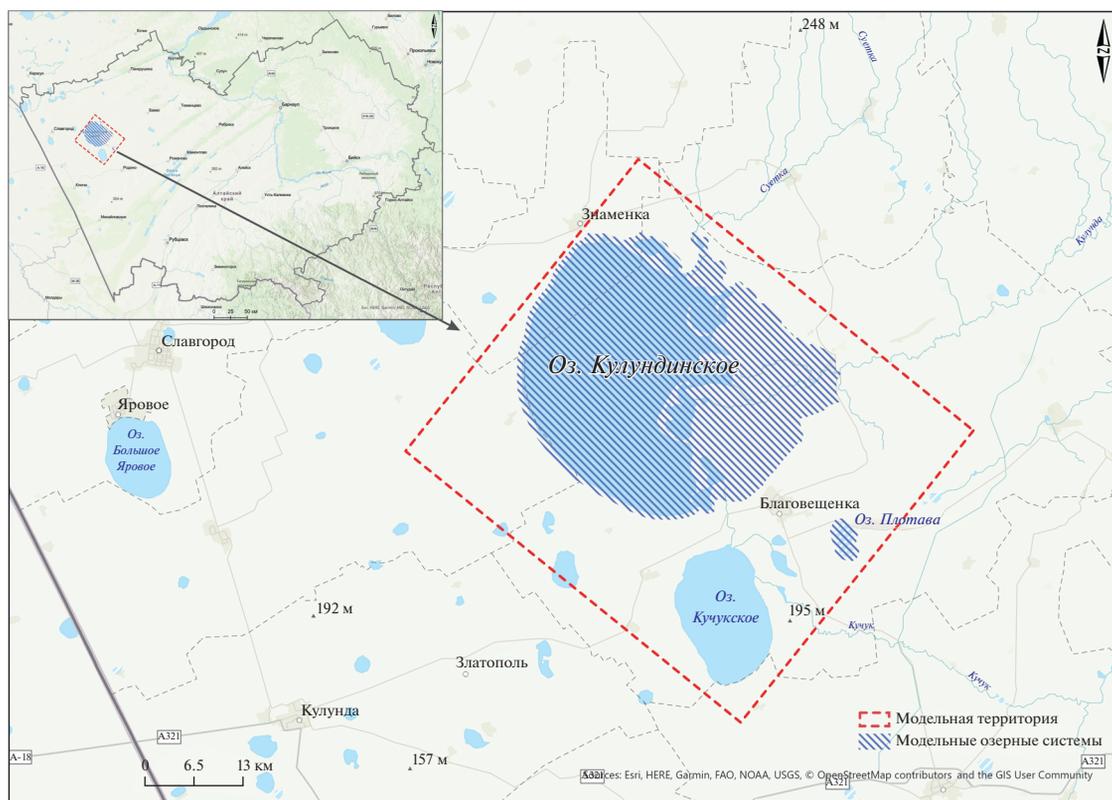


Рис. 1. Территория исследования.

покрывающие территорию исследования за весь период доступных данных. При этом из анализа были исключены несколько лет (1991–1992, 1995, 1998–1999, 2006), для которых отсутствуют кондиционные данные. Для каждого года в анализе использовалось от одного до пяти снимков, полученных в течение теплого периода (конец апреля – начало октября), когда поверхность полностью свободна от снежного покрова. Количество используемых в анализе снимков определялось качеством сцен. Таким образом была подготовлена база данных дистанционного зондирования, включающая все кондиционные снимки за период съемки в теплый период 1989–2020 гг. (табл. 1).

Территория исследования покрывается одной сценой Landsat: WRS Path/Row 150/023 и тремя сценами Sentinel-2: S2\_T43UGU, S2\_T44ULD, S2\_T44UMD. На этапе предклассификационной обработки космических снимков проводилась их радиометрическая коррекция, а также поканальное склеивание и составление бесшовных мозаик (в случае в данными Sentinel-2). Далее из полных сцен снимков вырезалась область интереса (ключевые участки), и снимки подверглись автоматизированной классификации.

Подбор оптимального алгоритма выделения водных объектов является одной из основных ме-

тодических задач. Наиболее распространенным приемом распознавания водных поверхностей служит расчет водных индексов. Для территории исследования наилучшие результаты по точности и относительной скорости получения данных показало использование модифицированного нормализованного разностного водного индекса MNDWI. Индекс предложен McFeeters (1996) и вычисляется по формуле:

$$\text{MNDWI} = (\text{Green} - \text{SWIR}) / (\text{Green} + \text{SWIR}),$$

где Green – отражение в зеленой области спектра, SWIR – отражение в средней инфракрасной области спектра.

После всех классификационных операций проводилась оценка их точности. Данная процедура является необходимым этапом для понимания объективности полученных данных. Результаты классификации в нашем случае оценивались двумя способами: по матрице ошибок и построению линейных профилей вода–суша (Congalton and Green, 2009).

#### *Анализ динамики и расчет индексов засушливости*

Для расчетов индексов засушливости были использованы данные метеостанций Slavgorod и Камень-на-Оби, доступные из открытых источ-

**Таблица 1.** Структура каталога данных космических снимков для территории исследования

1989 г.	1990 г.	1991 г.	1992 г.	1993 г.	1994 г.	1995 г.	1996 г.	1997 г.	1998 г.	1999 г.
L5_12.09	L5_24.04 L5_30.08	—	—	L5_19.06 L5_06.08	L5_05.05 L5_06.06	—	L5_17.10	L5_06.10	—	—
2000 г.	2001 г.	2002 г.	2003 г.	2004 г.	2005 г.	2006 г.	2007 г.	2008 г.	2009 г.	—
—	L7_03.07 L7_04.08	L7_19.05 L7_23.08	L7_26.08 L7_13.10	L7_09.06 L7_28.08	L7_11.05 L7_16.09	—	L5_26.06 L5_29.08	L5_30.07 L5_02.10	L5_30.05 L7_09.07 L5_18.08 L5_19.09	—
2010 г.	2011 г.	2012 г.	2013 г.	2014 г.	2015 г.	2016 г.	2017 г.	2018 г.	2019 г.	2020 г.
L7_09.05 L5_04.07 L5_22.09	L5_20.05 L7_16.08 L7_17.09	L7_30.05	L7_17.05 L8_12.07 L8_30.09	L7_04.05 L8_15.07 L7_24.08	L7_07.05 L7_24.06 L8_19.08	L8_01.05 L7_25.05 L8_05.08 L8_06.09	L7_26.04 S2_26.05 L8_07.07 L8_09.09 S2_13.10	S2_08.06 L8_10.07 S2_24.08 L8_28.09 S2_26.10	L8_10.05 L8_13.07 S2_04.08 L8_15.09	L8_12.05 L8_15.07 L8_03.10

**Таблица 2.** Режим увлажнения и значения индекса SPEI (Svoboda et al., 2012)

Режим увлажнения	Значения SPEI
Экстремально влажно	$\geq 2.0$
Очень влажно	1.5–1.99
Умеренно влажно	1.0–1.49
Близко к норме	от –0.99 до –0.99
Умеренно сухо	от 1.0 до –1.49
Сильно сухо	от –1.5 до –1.99
Экстремально сухо	$\leq -2.0$

ников<sup>1</sup>. Выбор метеостанций обусловлен как доступностью данных по основным параметрам (температуры воздуха, суммы атмосферных осадков, характеристики снежного покрова), так и расположением относительно исследуемых озерных систем. Метеостанция Славгород расположена в непосредственной близости от исследуемых водоемов (до Кулундинского озера 48 км) и характеризует климат подзоны сухой степи. Однако обширный бассейн оз. Кулундинского расположен восточнее самого озера, в степной и лесостепной зонах. Метеостанция Камень-на-Оби (подзона южной лесостепи) является единственной из доступных метеостанций, близких к верховьям и центральной части бассейна р. Кулунды и Кулундинского озера. В анализе и расчетах использовались массивы данных среднесуточных температур воздуха и сумм осадков, а также данные маршрутных снегомерных съемок за период с 1970 по 2020 г.

<sup>1</sup> Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации. <http://www.meteo.ru> (дата обращения 10.06.2021).

Для оценки продолжительности и интенсивности засушливых периодов в работе был использован индекс SPEI (Standardised Precipitation Evapotranspiration Index) (Vicente-Serrano et al., 2010). Расчет SPEI основан на среднемесячных данных об атмосферных осадках и температуре воздуха. Преимуществом этого индекса (например, над индексом SPI – Standard Precipitation Index) является возможность учета изменчивости температур воздуха при оценке засух. Значения SPEI можно интерпретировать как количество стандартных отклонений, на которые наблюдаемая аномалия отклоняется от среднего многолетнего значения за выбранный период времени.

Мы рассчитывали SPEI для 1-, 3-, 6-, 8-, 12-, 24-, 36-месячных периодов. Индексы, рассчитанные для периода до 3-х месяцев, используются для выявления кратковременных аномалий во влажности почв, количестве снежного покрова, стока на небольших водосборах, период до 12-ти месяцев – для среднесрочного мониторинга засух одного вегетационного периода, долгосрочные индексы (до 48 мес.) – для выявления долговременных аномалий, сопровождающихся, как правило, существенным снижением уровня грунтовых вод, уменьшением речного стока и другими последствиями. Стандартная градация режимов увлажнения по индексу SPEI (совпадает с SPI) представлена в табл. 2. При расчете индекса также рассчитывается параметр потенциальной эвапотранспирации (PET), который вычислялся по методу Торнхейта (Thornthwaite, 1948). Расчет индекса производился с помощью библиотеки SPEI в R (Beguería et al., 2014; Vicente-Serrano et al., 2010).

*Анализ данных*

Учитывая большие различия в абсолютных значениях площадей водоемов между Кулундинским и Плотавским участками, в процессе анализа мы использовали как абсолютные значения, так и стандартизированные значения площадей водной поверхности. Стандартизированные значения ( $z$ -score) рассчитывались как отклонения площадей водной поверхности от среднего значения, нормированные на стандартное отклонение ( $\sigma$ ) по ряду наблюдений.

Для оценки связей между максимальными за год площадями водной поверхности, индексами SPEI и максимальными снегозапасами использовался ранговый коэффициент корреляции Спирмена. Максимальные за зиму снегозапасы выступали как индикатор снежности зимних периодов. Коэффициент корреляции Спирмена также рассчитывался между значениями площадей водоемов на Кулундинском и Плотавском участках на одни и те же даты съемки. Расчет корреляции производился для оценки связи между колебаниями площадей водоемов в двух озерных системах. Выбор непараметрических методов оценки обусловлен значимыми отклонениями рядов наблюдений от нормального распределения (по тесту Шапиро—Уилка), прежде всего по Плотавскому участку.

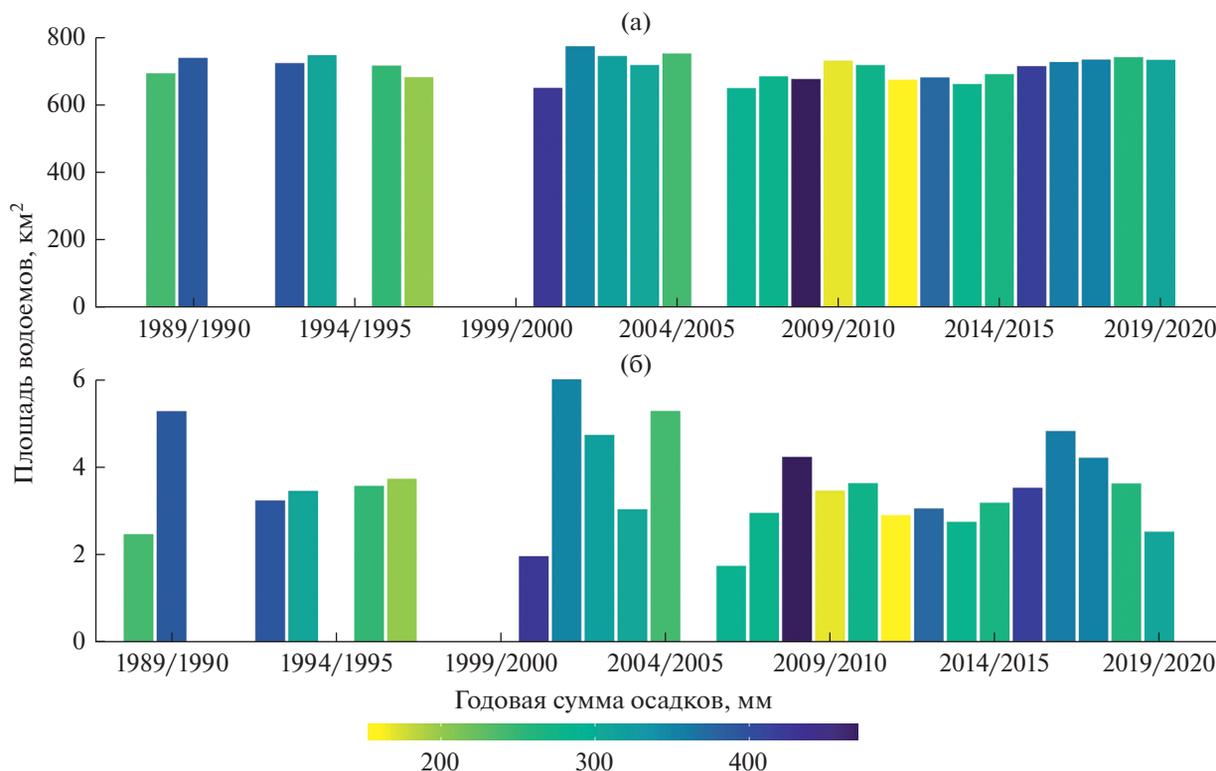
Наличие многолетних тенденций в динамике площадей водной поверхности и климатических данных (температуры, осадки и максимальные снегозапасы) оценивалось с помощью непараметрического теста Манна—Кендалла (с поправкой на автокоррелированность и сезонность для климатических переменных). Перед проведением расчетов ряды данных были проверены на однородность и стационарность с помощью  $t$ -теста (по среднему значению),  $F$ -теста (по дисперсии) и расширенного теста Дики—Фуллера. Для расчетов  $t$ - и  $F$ -статистик ряды данных были разделены на две относительно равные части. Для оценки тенденций динамики водной поверхности использовались непрерывные ряды данных, начиная с 2008 г. По большинству критериев ряды были близки к однородным и стационарным (при  $\alpha = 5\%$ ). Однако определенные признаки неоднородности наблюдались по ряду годовых сумм осадков и среднегодовых температур по метеостанции Славгород (по  $t$ -тесту) и максимальных площадей водной поверхности на Кулундинском участке (по тесту Дики—Фуллера). Все расчеты и анализ данных производились в среде R.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

*Многолетняя динамика площади водной поверхности и ее связь с засушливыми и влажными периодами*

Площади водной поверхности в пределах Кулундинского и Плотавского участков не показывают каких-либо тенденций к последовательному сокращению (рис. 2). Более того, с 2008 г. на Кулундинском участке отмечен слабый, но статистически значимый тренд увеличения площадей водной поверхности ( $M-K z = 2.01$ ,  $p$ -value = 0.04408) величиной около 5.02 км<sup>2</sup>/год. Подобная динамика контрастирует с другими внутриконтинентальными бассейнами, где нередко наблюдается усыхание водоемов. В Северо-Западном Китае площадь водоемов в густонаселенных районах сократилась на 40% с 2000 г. (Fang et al., 2018), а крупнейшее озеро Эби-Нур — более чем вдвое (Zhang et al., 2020). Во всей Центральной Азии с 2000 г. наблюдалось сокращение как максимальных за год, так и минимальных площадей водоемов, но скорость сокращения максимумов была вдвое выше (Che et al., 2019). Часть крупных озер в Центральной Азии показывает вполне стабильную динамику, например, оз. Алаколь и Саякколь изменялись в пределах 1% от своей площади (Bai et al., 2011). В основном такие тенденции в аридных регионах обусловлены антропогенным воздействием, включающим в себя масштабный забор воды на ирригацию и иные нужды (Fang et al., 2018; Sillio-Calzada et al., 2017; Zhang et al., 2020). Другими словами, климатические причины не играют роль единственного деструктивного фактора, хотя и могут существенно усиливать негативное воздействие. На Кулундинской равнине антропогенное воздействие на водотоки, питающие озера, достаточно умеренное, что может обуславливать относительную стабильность уровней воды. Ирригационное земледелие находится в кризисе (Орлова, 2011), количество и работоспособность гидротехнических сооружений (прудов) в регионе снижается (Губарев и др., 2017), соответственно снижается и зарегулированность стока рек, питающих озера.

Динамика климатических параметров за период исследования (с 1970 г.) по метеостанциям Славгород и Камень-на-Оби была близка к ранее отмеченным тенденциям (Kharlamova, 2020; Shulgina et al., 2011). Среднегодовые температуры воздуха имели значимые тенденции к росту на обеих метеостанциях (Славгород:  $M-K z = 3.1$ ,  $p$ -value = 0.002258; Камень-на-Оби:  $M-K z = 2.7$ ,  $p$ -value = 0.006671) примерно на 0.3°C/10 лет. Максимальные снегозапасы и годовые суммы осадков в основном оставались стабильными, кроме сумм осадков по метеостанции Славгород. Здесь был отмечен слабый тренд ( $M-K z = -2.1439$ ,  $p$ -value = 0.03204) снижения сумм осадков на 10.4 мм/10 лет.



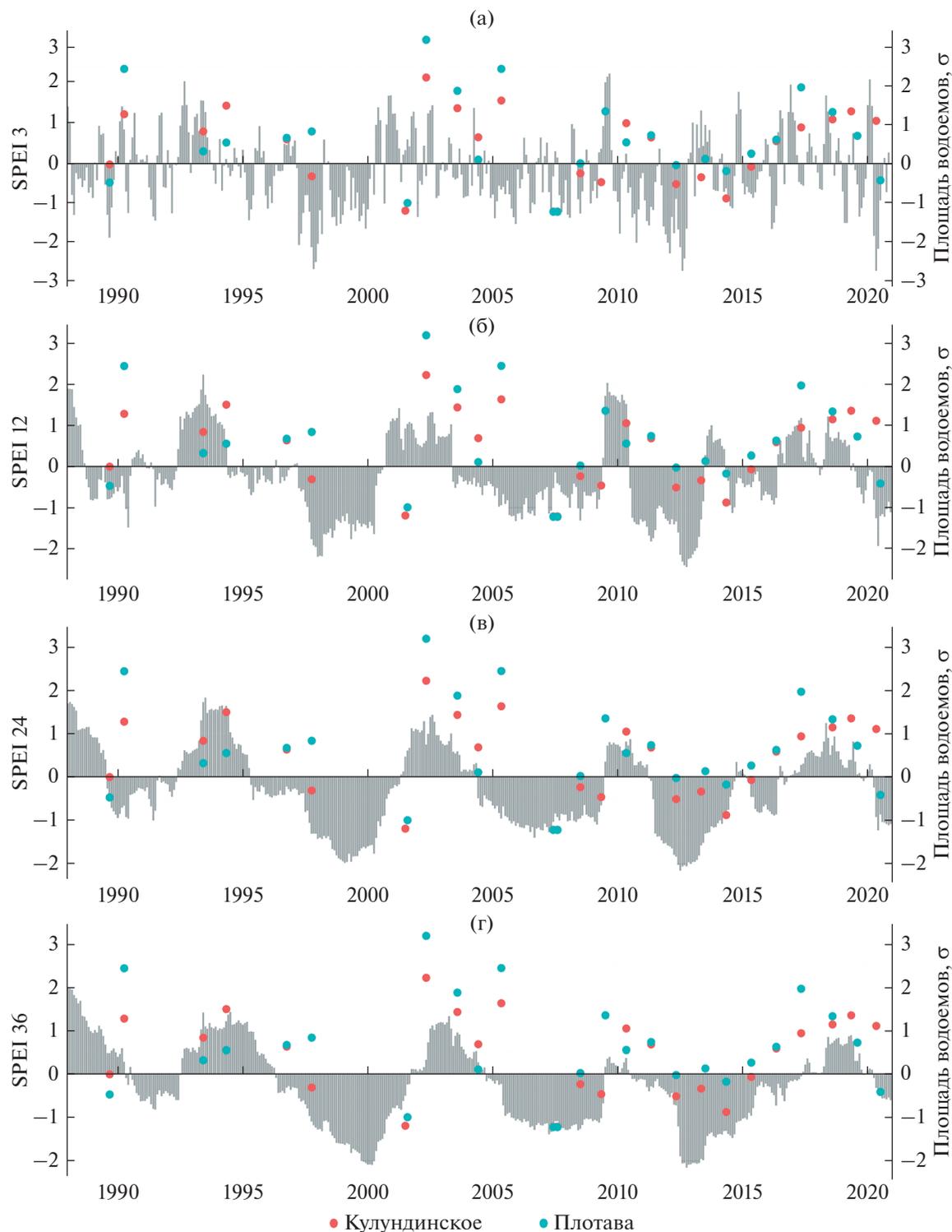
**Рис. 2.** Максимальные площади водоемов Кулундинской (а) и Плотавской (б) систем озер и суммы осадков за гидрологический год по метеостанции Славгород.

Суммы атмосферных осадков каждого конкретного года слабо влияют на площади водной поверхности (см. рис. 2 и цветовую шкалу по количеству осадков). Большие площади водоемов могут наблюдаться в годы с малым атмосферным увлажнением. Как пример можно привести 2010 и 2005 гг. на Кулундинском участке. Также на Кулундинском участке наиболее ярко проявляется определенное запаздывание реакции водоемов на изменения атмосферного увлажнения. Наиболее высокие значения площадей водоемов отмечены спустя 2–3 года после влажных лет, либо серий влажных лет. Эта тенденция хорошо иллюстрируется 24- и 36-месячными индексами SPEI (рис. 3в, г). Таковыми были практически все пиковые по площадям водоемов годы – 1994, 2002, 2005, 2019. Достаточно высокие значения площадей водоемов в 2010 г. наблюдались вообще на фоне аномально сухого года (менее 200 мм осадков). Данная закономерность работает и в обратном направлении. Достаточно влажные годы (например, 2001) могли сопровождаться низкими значениями площадей водоемов. Однако таким годам, как правило, предшествовали достаточно сухие периоды в 1–3 года (например, 1997–1999 гг.).

На значительно меньшем по площади Плотавском участке определенная инерционность реакций на изменения атмосферного увлажнения

также прослеживается (см. рис. 3). Кроме этого, многие другие пиковые годы также совпадают с таковыми на Кулундинском участке (1990, 2002, 2005). Определенные отличия отмечались лишь в последние годы, когда на Кулундинском участке наблюдалась тенденция к увеличению покрытых водой площадей, тогда как на Плотавском участке это отмечалось ранее – в 2017 г.

Рассмотренные выше закономерности подтверждаются корреляционным анализом (табл. 3). Статистически значимые коэффициенты корреляции площадей водной поверхности были отмечены только с долгосрочными 24- и 36-месячными индексами SPEI и только для Кулундинского участка. Кроме этого, значения коэффициентов корреляции были выше для индексов, рассчитанных по метеостанции Славгород. Возможно, свою роль сыграло расположение метеостанции Камень-на-Оби в долине р. Обь. Тем не менее общее направление усиления связи сохранялось (от краткосрочных к долгосрочным SPEI). Несмотря на низкие и статистически незначимые коэффициенты корреляции для Плотавского участка, значения коэффициентов там также увеличивались в сторону долгосрочных индексов SPEI. Значения максимальных снегозапасов для всех участков и метеостанций имели незначимые коэффициенты корреляции с изменениями площади водоемов.



**Рис. 3.** Значения 3- (а), 12- (б), 24- (в), 36-месячных (г) индексов SPEI и стандартизированные (в единицах стандартного отклонения,  $\sigma$ ) площади водоемов. SPEI приводится по метеостанции Славгород.

Водоемы как Кулундинского, так и Плотавского участков гораздо активнее реагировали на влажные периоды в сравнении с засушливыми. За период с 1989 по 2020 г. в регионе отмечено три про-

должительных засушливых периода (см. рис. 3б). Сильные и даже экстремальные засухи наблюдались в 1997–2000 и 2011–2014 гг. (SPEI 12 до  $-2.4$ ). Умеренно засушливый период был в 2004–2009 гг.

**Таблица 3.** Значения коэффициентов корреляции Спирмена\*, рассчитанные между значениями максимальных за год площадей водоемов, значениями индексов SPEI за 1-, 3-, 4-, 6-, 8-, 12-, 24-, 36-месячные периоды и величинами максимальных снегозапасов (SWE)

Озерная система	SPEI 1	SPEI 3	SPEI 4	SPEI 6	SPEI 8	SPEI 12	SPEI 24	SPEI 36	SWE
Метеостанция Камень-на-Оби									
Кулундинское	−0.42	−0.14	−0.15	−0.12	−0.16	0.03	0.39	<b>0.59</b>	−0.29
Плотава	−0.33	0.01	0.06	0.14	0.09	0.37	0.13	0.47	−0.10
Метеостанция Славгород									
Кулундинское	−0.18	0.11	0.20	0.23	0.25	0.35	<b>0.63</b>	<b>0.77</b>	0.04
Плотава	−0.15	0.16	0.27	0.29	0.33	0.27	0.43	0.48	−0.02

\* Полужирным шрифтом выделены значения коэффициентов корреляции значимые при  $p < 0.05$ . Уровень значимости оценивался с учетом поправки на множественные сравнения по методу Холма—Бонферрони, без учета поправки число значимых связей было больше.

(SPEI 12 до −1.3). Несмотря на сильные и достаточно продолжительные засухи, стандартизированные площади водоемов не опускались ниже −1.2 (2001 и 2007 гг.). Даже в самый экстремальный засушливый период 2011–2014 гг. площади водоемов Кулундинского участка составляли от −0.5 до −0.8  $\sigma$ . На Пловатском участке стандартизированные площади водной поверхности и вовсе были близки к средним в диапазоне −0.17...−0.13  $\sigma$ . В то же время даже в весьма умеренные влажные периоды, как, например, в 2000–2003 гг. (SPEI 12 до 1.4), отмечалось увеличение площадей вплоть до 2.2  $\sigma$  на Кулундинском участке и 3.1  $\sigma$  на Пловатском в 2002 г. Подобная реакция наблюдалась и в последние годы, когда умеренный влажный период 2016–2019 гг. сопровождался увеличением площадей до 1.3–1.9  $\sigma$ . Для находящегося севернее бессточного озера Чаны делалось предположение (Обзор ..., 2015), что в многоводные годы происходит уменьшение количества бессточных понижений в бассейне озера и избытки воды поступают в конечный водоем, тогда как в маловодные — площадь бессточных понижений увеличивается, а потери влаги на испарение и фильтрацию возрастают.

*Синхронность и асинхронность межгодовых колебаний Кулундинской и Пловатской озерных систем*

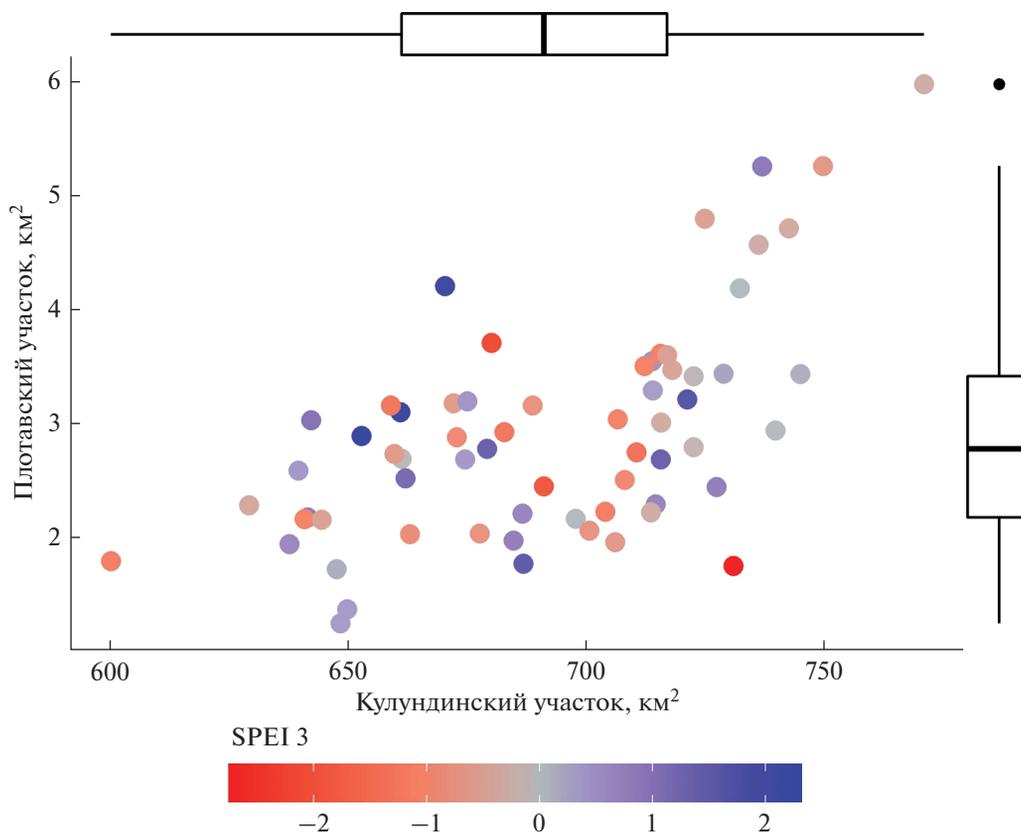
Несмотря на разницу в размерах Кулундинской и Пловатской озерных систем, площади водоемов изменялись во времени достаточно синхронно. Коэффициент корреляции Спирмена между площадями водоемов на одни и те же даты наблюдений составил 0.58 (значим при  $p < 0.001$ ). Кроме этого, практически не наблюдалось каких-то взаимосвязей с кратковременными влажными или сухими периодами, выраженными через 3-месячный индекс SPEI (рис. 4). Ожидалось, что небольшая Пловатская озерная система будет острее реагировать на кратковременные колеба-

ния увлажнения, а площади водоемов Кулундинской системы будут оставаться стабильными. Однако примеров таких реакций немного. Например, в экстремально засушливом мае 2020 г. (SPEI 3–2.7) площадь водоемов Пловатского участка была меньше 2 км<sup>2</sup>, тогда как площадь Кулундинской системы в 730.7 км<sup>2</sup> была даже выше медианной (см. рис. 3 и 4). Противоположная ситуация наблюдалась во влажный 2009 г. (SPEI 3 2.1–2.3), когда площадь озер Кулундинской системы была меньше 670 км<sup>2</sup>, а Пловатской — составляла от 2.9 до 4.2 км<sup>2</sup>. В целом же отмеченные примеры можно рассматривать как исключения из общей синхронности колебаний площадей водоемов двух озерных систем.

Диапазон межгодового варьирования Пловатской озерной системы (в относительных величинах) был существенно выше, чем у Кулундинской (см. рис. 2). Если размах варьирования площадей водной поверхности на Кулундинском участке был 171 км<sup>2</sup> (в пределах 25% от средней площади), то для Пловатской системы этот показатель составлял 4.7 км<sup>2</sup>, или 163% от средней площади водоемов системы. Коэффициент вариации при этом для Кулундинской системы составил 5.2% а для Пловатской — 33.2%. Значительное варьирование весьма характерно для подобных замкнутых понижений (Hayashi et al., 2016).

*Внутригодовая динамика площади водоемов*

Для исследуемых водоемов прослеживается достаточно четкий режим внутригодовой изменчивости площадей: с максимальными значениями в мае (после весеннего половодья) и постепенным снижением в течение летне-осенней межени. Максимальные уровни наблюдались только в трех месяцах в году: мае, июле и августе (рис. 5). Для Кулундинской системы май чаще всего являлся пиковым месяцем. Из этой закономерности выбивается лишь 2018 г., когда максимальные



**Рис. 4.** Взаимосвязь площадей водоемов Кулундинского и Плотава́ского участков на один и тот же срок наблюдений. Цветом показаны значения 3-х месячного индекса SPEI. Диаграммой “ящик с усами” показаны распределения площадей водоемов, нижний и верхний края “ящика” обозначают первый и третий квартили соответственно, центральная линия обозначает медиану, “усы” соответствуют максимальному значению, но не более полутора межквартильных размахов; измерения, выходящие за данный интервал отмечены как выбросы (черные точки).

площади были зафиксированы в августе, а с июня происходил их постепенный рост. Пиковые значения августа 2018 г., скорее всего, связаны с переходом от длительного сухого к влажному периоду, который хорошо выражен через 12- и 24-месячные индексы SPEI (см. рис. 36, в). На Плотава́ском участке внутригодовая динамика площадей водоемов до 2017 г. также в целом следовала закономерности по снижению площадей от мая к октябрю. В последние же годы (2017–2020) наблюдалась существенная нестабильность. Максимальные площади сдвинулись на июль и август. Площади водоемов могли отличаться на несколько квадратных километров даже между соседними месяцами (например, в 2017 и 2018 гг.). Скорее всего, это также связано с переходом от неустойчивого влажного к сухому периоду, когда водоемы резко реагируют на какие-либо кратковременные метеорологические события.

В относительных величинах внутригодовой размах варьирования площадей водоемов на Плотава́ском участке был выше такового в пределах Кулундинского участка. В среднем в пределах одного года размах варьирования составлял  $1.1 \text{ км}^2$

(39% от средней площади) на Плотава́ском участке и  $45.8 \text{ км}^2$  (6.6%) на Кулундинском. Среднегодовой коэффициент вариации площадей водоемов на Кулундинском участке также был существенно ниже (3.7%), чем на Плотава́ском (20.4%). После 2017 г. внутригодовой размах варьирования площадей водоемов на Кулундинском участке снижался (коэффициент вариации после 2017 г. 2.0%) (см. рис. 5). Другими словами, площади водоемов были стабильно высокими с мая по октябрь. На Плотава́ском участке с 2017 по 2019 г. варьирование, наоборот, увеличивалось. Размах варьирования площадей вырос до  $2 \text{ км}^2$ , а коэффициент вариации до 26.7%.

Увеличение площадей водоемов и стабильно высокие уровни с 2018 по 2020 г. на Кулундинском участке соотносятся со схожими тенденциями на соседнем Приобском плато. Там увеличение площадей водоемов было по настоящему экстремальным (до  $3 \sigma$  в стандартизированных величинах) и превысило значения за весь доступный период наблюдений (Черных и др., 2020). На Кулундинской равнине рост был вполне в пределах многолетнего размаха изменчивости, однако не

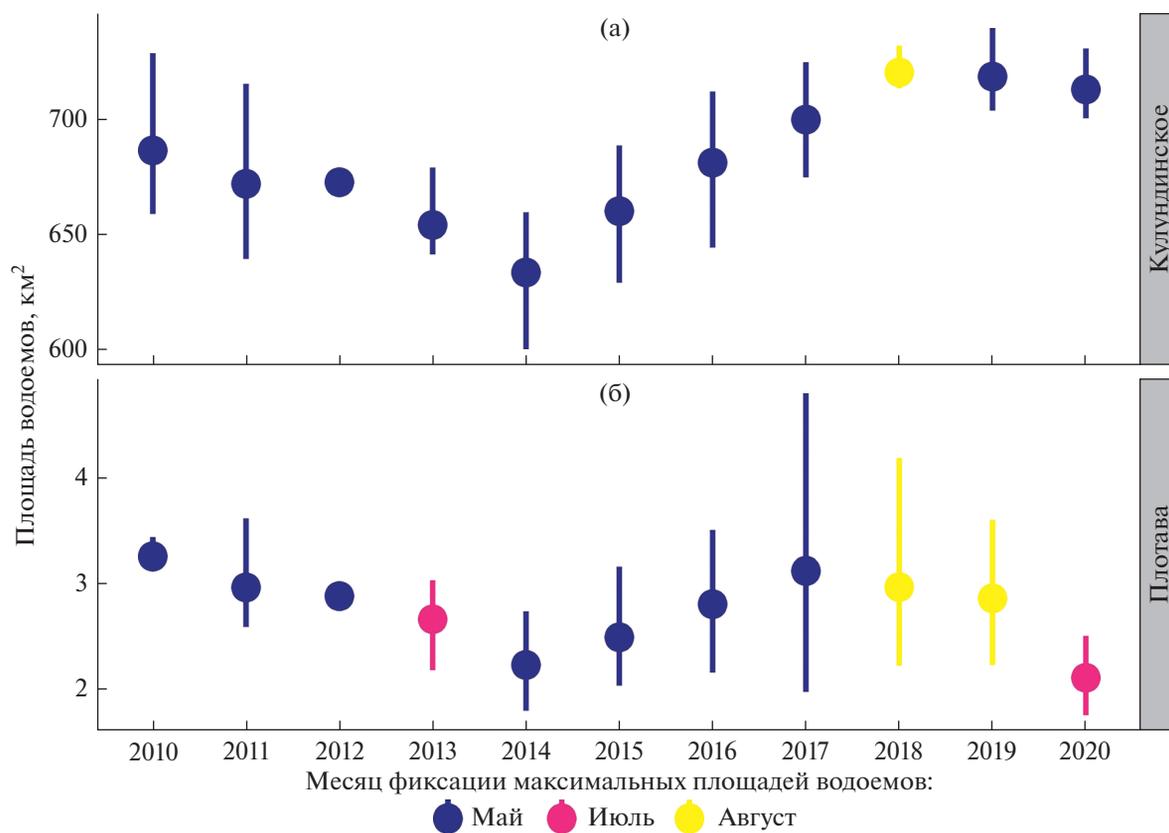


Рис. 5. Средние значения и размах варьирования площадей водоемов Кулундинского (а) и Плотавского (б) участков за 2010–2020 гг.

вполне объясним с точки зрения гидротермических показателей (происходил на фоне умеренного периода после засухи 2011–2014 гг.).

## ВЫВОДЫ

Анализ динамики площадей водоемов в двух бессточных озерных системах Кулундинской равнины, проведенный на основе данных дистанционного зондирования за период 1989–2020 гг., показал отсутствие тенденций к направленному сокращению площадей водоемов. Несмотря на наличие нескольких сильных засух за последние 30 лет, водоемы Кулундинской и Плотавской озерных систем не испытывали каких-либо чрезвычайно резких сокращений площадей водной поверхности.

Выявлено, что межгодовая динамика водоемов слабо зависит от колебаний метеорологических условий конкретного года. Статистически значимые взаимосвязи обнаружены только с длительными 24- и 36-месячными индексами засушливости SPEI, что в целом указывает на определенную устойчивость механизмов питания озерных систем в Кулунде.

Кулундинская и Плотавская озерные системы показывали высокую синхронность межгодовых

колебаний площадей водоемов, несмотря на значительную разницу в площади водоемов и размерах водосборных бассейнов. Относительный размах внутригодового варьирования внутри небольшой Плотавской озерной системы был существенно выше, чем в значительно большей Кулундинской системе. Определенная стабильность функционирования озерных систем Кулундинской равнины может быть связана с весьма умеренным антропогенным воздействием на питающие их водотоки в последние десятилетия: отсутствие масштабного забора воды и регулирования стока гидротехническими сооружениями.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ

Анализ метеоусловий и расчет индексов засушливости выполнен в рамках государственного задания (номер госрегистрации 1021032422891-7), дешифрирование данных дистанционного зондирования и их анализ выполнен при финансовой поддержке РФФИ, проект № 18-45-220001 p\_a.

## FUNDING

The meteorological fluctuations analysis and calculation of drought indices were carried out within the state

project no. 1021032422891-7. Remote sensing data analysis was funded by RFBR, project no. 18-45-220001 p\_a.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Булатов В.И., Ротанова И.Н., Черных Д.В. Ландшафтно-экологический и картографический анализ озерно-бассейновых систем юга Западной Сибири (озера Чаны и Кулундинское) // Сиб. экол. журн. 2005. № 2. С. 175–182.
- Губарев М.С., Рыбкина И.Д., Стоящева Н.В. Инвентаризация состояния прудов на притоках реки Алей в степной зоне Алтайского края // Вестн. Алтайского гос. аграрного ун-та. 2017. № 6 (152). С 61–68.
- Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М.: Росгидромет, 2021. 104 с.
- Обзор экологического состояния озера Чаны (Западная Сибирь) / отв. ред. О.Ф. Васильев, Я. Вейн. Новосибирск: Академическое изд-во “Гео”, 2015. 255 с.
- Орлова И.В. Проблемы развития ирригации в Алтайском крае и вопросы ее экологической безопасности // Ползуновский вестн. 2011. № 4–2. С. 93–97.
- Черных Д.В., Золотов Д.В., Бирюков Р.Ю., Першин Д.К. Пространственно-временная динамика аквальных и сопряженных с ними геосистем на юге Западной Сибири в условиях климатических изменений: Матер. науч. конф. Деградация земель и опустынивание: проблемы устойчивого природопользования и адаптации. М., 2020. С. 135–140. <https://doi.org/10.29003/m1694.978-5-317-06490-7/135-140>
- Argyilan E.P., Forman S.L. Lake level response to seasonal climatic variability in the Lake Michigan–Huron system from 1920 to 1995 // J. Great Lakes Res. 2003. Vol. 29. P. 488–500. [https://doi.org/10.1016/S0380-1330\(03\)70453-5](https://doi.org/10.1016/S0380-1330(03)70453-5)
- Bai J., Chen X., Li J., Yang L., Fang H. Changes in the area of inland lakes in arid regions of central Asia during the past 30 years // Environ. Monitoring and Assessment. 2010. Vol. 178. Iss. 1. P. 247–256. <https://doi.org/10.1007/S10661-010-1686-Y>
- Beguéria S., Vicente-Serrano S.M., Reig F., Latorre B. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring // Int. J. Climatol. 2014. Vol. 34. Iss. 10. P. 3001–3023. <https://doi.org/10.1002/joc.3887>
- Che X., Feng M., Sexton J., Channan S., Sun Q., Ying Q., Wang Y. Landsat-Based Estimation of Seasonal Water Cover and Change in Arid and Semi-Arid Central Asia (2000–2015) // Remote Sens. 2019. Vol. 11. P. 1323. <https://doi.org/10.3390/RS11111323>
- Congalton R., Green K. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices. 2nd Ed. Boca Raton: CRC/Taylor & Francis, 2009. 183 p.
- Degefie D.T., Fleischer E., Klemm O., Soromotina A.V., Soromotina O.V., Tolstikov A.V., Abramov N.V. Climate extremes in South Western Siberia: past and future // Stoch. Environ. Res. Risk Assess. 2014. Vol. 28. P. 2161–2173. <https://doi.org/10.1007/s00477-014-0872-9>
- Fang L., Tao S., Zhu J., Liu Y. Impacts of climate change and irrigation on lakes in arid northwest China // J. Arid Environ. 2018. Vol. 154. P. 34–39. <https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2018.03.008>
- Groisman P.Ya., Blyakharchuk T.A., Chernokulsky A.V., et al. Climate changes in Siberia // Reg. Environ. Changes in Siberia and Their Global Consequences / Groisman P.Ya., Gutman G. (Eds.). Dordrecht: Springer Environmental Science and Engineering, 2013. P. 57–109. [https://doi.org/10.1007/978-94-007-4569-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4569-8_3)
- Hayashi M., van der Kamp G., Rosenberry D.O. Hydrology of Prairie Wetlands: Understanding the Integrated Surface-Water and Groundwater Processes // Wetland. 2016. Vol. 36. P. 237–254. <https://doi.org/10.1007/s13157-016-0797-9>
- Kharlamova N.F. Climatic Variability of the Kulunda Steppe // KULUNDA: Climate Smart Agriculture. South Siberian Agro-steppe as Pioneering Region for Sustainable Land Use / Frühauf M., Guggenberger G., Meinel T., Theesfeld I., Lentz S. (Eds.). Springer Int. Publ., 2020. P. 19–32. <https://doi.org/10.1007/978-3-030-15927-6>
- Leibowitz S.G., Vining K.C. Temporal connectivity in a prairie pothole complex // Wetlands. 2003. Vol. 23. Iss. 1. P. 13–25. [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2003\)023\[0013:TCIAPP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2003)023[0013:TCIAPP]2.0.CO;2)
- Lenters J.D., Kratz T.K., Bowser C.J. Effects of climate variability on lake evaporation: Results from a longterm energy budget study of Sparkling Lake, northern Wisconsin (USA) // J. Hydrol. 2005. Vol. 308. P. 168–195. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.10.028>
- McFeeters S.K. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features // Int. J. Remote Sens. 1996. Vol. 17. P. 1425–1432. <https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Mikkola K. A remote sensing analysis of vegetation damage around metal smelters in the Kola Peninsula, Russia // Int. J. Remote Sens. 1996. Vol. 17. P. 3675–3690. <https://doi.org/10.1080/01431169608949177>
- Ozesmi S.L., Bauer M.E. Satellite remote sensing of wetlands // Wetl. Ecol. Manag. 2002. Vol. 10. Iss. 5. P. 381–402. <https://doi.org/10.1023/A:1020908432489>
- Prishchepov A.V., Radeloff V.C., Baumann M., Kuemmerle T., Müller D. Effects of institutional changes on land use: agricultural land abandonment during the transition from state-command to market-driven economies in post-Soviet Eastern Europe // Environ. Res. Lett. 2012. Vol. 7. P. 1–13. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024021>
- Sada R., Schmalz B., Kiesel J., Fohrer N. Projected changes in climate and hydrological regimes of the Western Siberian lowlands // Environ. Earth Sci. 2019. Vol. 78. Iss. 2. P. 1–15. <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8047-0>
- Shaw D.A., van der Kamp G., Conly F.M., Pietroniro A., Martz L. The fill-and-spill hydrology of prairie wetland complexes during drought and deluge // Hydrol. Processes. 2012. Vol. 26. P. 3147–3156. <https://doi.org/10.1002/hyp.8390>

- Shulgina T.M., Genina E.Yu., Gordov E.P.* Dynamics of climatic characteristics influencing vegetation in Siberia // *Environ. Res. Lett.* 2011. Vol. 6. № 4. P. 1–7. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/4/045210>
- Silio-Calzada A., Barquín J., Huszar V.L.M., Mazzeo N., Méndez F., Álvarez-Martínez J.M.* Long-term dynamics of a floodplain shallow lake in the Pantanal wetland: Is it all about climate? // *Sci. of The Total Environ.* 2017. Vol. 605–606. P. 527–540. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2017.06.183>
- Svoboda M., Hayes M., Wood D.* Standardized Precipitation Index User Guide. Geneva: World Meteorological Organization, 2012. 24 p.
- Thorntwaite C.W.* An approach toward a rational classification of climate // *Geograph. Rev.* 1948. Vol. 38. P. 55–94. <https://doi.org/10.2307/2107309>
- Tiner R.W.* Geographically isolated wetlands of the United States // *Wetlands.* 2003. Vol. 23. Iss. 3. P. 494–516. [https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2003\)023\[0494:GIWOTU\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2003)023[0494:GIWOTU]2.0.CO;2)
- Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I.* A Multiscalar Drought Index Sensitive to Global Warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index // *J. Climate.* 2010. Vol. 23. Iss. 7. P. 1696–1718. <https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Walker D.A., Acevedo W.* Vegetation and a Landsat-derived land cover map of the Beechey Point Quadrangle, Arctic Coastal Plain, Alaska. Hanover, NH: U.S. Army Cold Regions Engineering and Research Laboratory, CRREL Report 87–5, 1987. 63 p.
- Zhang J., Ding J., Wu P., Tan J., Huang S., Teng D., Chen W.* Assessing arid Inland Lake Watershed Area and Vegetation Response to Multiple Temporal Scales of Drought Across the Ebinur Lake Watershed // *Sci. Reports.* 2020. Vol. 10. Iss. 1. P. 1–17. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-57898-8>

## Dynamic Changes of the Steppe Zone Lakes in Altai Krai under Anthropogenic Impacts and Climate Change

D. V. Chernykh<sup>1</sup>\*, R. Yu. Biryukov<sup>1</sup>, and D. K. Pershin<sup>1</sup>

<sup>1</sup>*Institute for Water and Environmental Problems, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Barnaul, Russia*

\*e-mail: [chernykh@mail.ru](mailto:chernykh@mail.ru)

Multiscale relict lakes are the essential elements of the steppe plains in Altai krai in Russia (South Siberia). Based on the remote sensing data (Landsat and Sentinel-2 images), we analyzed the water bodies' area dynamics in the two endorheic lake systems of the Kulunda Steppe—Kulunda and Plotava. We found no evident tendency to reduce water bodies' area between 1989 and 2020. Despite several severe droughts during the last 30 years, water bodies of Kulunda and Plotava lake systems have not experienced any extremely sharp reductions. The SPEI index was used to estimate the duration and intensity of droughts. It was shown that the inter-annual dynamics of lakes weakly depend on weather fluctuations of a particular year. Statistically significant correlations were found only with 24- and 36-month SPEI indices, which generally indicated the relative stability of feeding mechanisms of lake systems in Kulunda Steppe. Despite the significant difference in catchments and lake areas, the Kulunda and Plotava lake systems were characterized by high synchrony of inter-annual fluctuations. The relative range of intra-annual variation within the small Plotava lake system was significantly higher than in the much larger Kulunda system. Stability in the functioning of the Kulunda lake systems may be related to a very moderate human impact on the feeding watercourses in recent decades. There was the absence of large-scale water withdrawal and flow regulation.

*Keywords:* lakes, climate change, drought indices, remote sensing data, steppe zone, Kulunda, Altai krai

### REFERENCES

- Argyilan E.P., Forman S.L. Lake level response to seasonal climatic variability in the Lake Michigan—Huron system from 1920 to 1995. *J. Great Lakes Res.*, 2003, vol. 29, no. 3, pp. 488–500. [https://doi.org/10.1016/S0380-1330\(03\)70453-5](https://doi.org/10.1016/S0380-1330(03)70453-5)
- Bai J., Chen X., Li J., Yang L., Fang H. Changes in the area of inland lakes in arid regions of central Asia during the past 30 years. *Environ. Monit. Assess.*, 2010, vol. 178, no. 1, pp. 247–256. <https://doi.org/10.1007/S10661-010-1686-Y>
- Beguería S., Vicente-Serrano S.M., Reig F., Latorre B. Standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) revisited: parameter fitting, evapotranspiration models, tools, datasets and drought monitoring. *Int. J. Climatol.*, 2014, vol. 34 (10), pp. 3001–3023. <https://doi.org/10.1002/joc.3887>
- Bulatov V.I., Rotanova I.N., Chernykh D.V. Landscape-ecological and cartographic analysis of lake basin systems of the south of West Siberia (lakes Chany and Kulunda). *Sib. Ekol. Zh.*, 2005, no. 2, pp. 175–182. (In Russ.).
- Che X., Feng M., Sexton J., Channan S., Sun Q., Ying Q., Wang Y. Landsat-based estimation of seasonal water cover and change in arid and semi-arid Central Asia (2000–2015). *Remote Sens.*, 2019, vol. 11, pp. 1323. <https://doi.org/10.3390/RS11111323>
- Chernykh D.V., Zolotov D.V., Biryukov R.Yu., Pershin D.K. Spatiotemporal dynamics of aquatic and associated geosystems in the south of Western Siberia under cli-

- mate change. In *Degradatsiya zemel' i opustynivanie: problemy ustoichivogo prirodopol'zovaniya i adaptatsii. Mat. Mezhd. konf.* [Land Degradation and Desertification: Problems of Sustainable Land Management and Adaptation: Proc. Int. Sci. Pract. Conf.]. Moscow: MAKS Press, 2020, pp. 135–140. (In Russ.).
- Congalton R., Green K. *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices*. Boca Raton: CRC Press, 2009, 2nd ed. 183 p.
- Degefie D.T., Fleischer E., Klemm O., Soromotin A.V., Soromotina O.V., Tolstikov A.V., Abramov N.V. Climate extremes in South Western Siberia: past and future. *Stoch. Environ. Res. Risk Assess.*, 2014, vol. 28, pp. 2161–2173.  
<https://doi.org/10.1007/s00477-014-0872-9>
- Doklad ob osobennostyakh klimata na territorii Rossiiskoi Federatsii za 2020 god* [Report on the Features of Climate in the Russian Federation in 2020]. Moscow: Rosgidromet, 2021. 104 p.
- Fang L., Tao S., Zhu J., Liu Y. Impacts of climate change and irrigation on lakes in arid northwest China. *J. Arid Environ.*, 2018, vol. 154, pp. 34–39.  
<https://doi.org/10.1016/j.JARIDENV.2018.03.008>
- Groisman P.Ya., Blyakharchuk T.A., Chernokulsky A.V. et al. Climate changes in Siberia. In *Regional Environmental Changes in Siberia and Their Global Consequences*. Groisman P., Gutman G., Eds. Dordrecht: Springer, 2013, pp. 57–109.  
[https://doi.org/10.1007/978-94-007-4569-8\\_3](https://doi.org/10.1007/978-94-007-4569-8_3)
- Gubarev M.S., Rybkina I.D., Stoyashcheva N.V. Inspection of ponds and small reservoirs at Aley river tributaries in the steppe zone of the Altai region. *Vestn. Altai Gos. Agrarn. Univ.*, 2017, vol. 152, no. 6, pp. 61–68. (In Russ.).
- Hayashi M., van der Kamp G., Rosenberry D.O. Hydrology of prairie wetlands: understanding the integrated surface-water and groundwater processes. *Wetland*, 2016, vol. 36, pp. 237–254.  
<https://doi.org/10.1007/s13157-016-0797-9>
- Kharlamova N.F. Climatic variability of the Kulunda steppe. In *KULUNDA: Climate Smart Agriculture. South Siberian Agro-steppe as Pioneering Region for Sustainable Land Use*. Frühauf M., Guggenberger G., Meinel T., Theesfeld I., Lentz S., Eds. Cham: Springer, 2020, pp. 19–32.  
<https://doi.org/10.1007/978-3-030-15927-6>
- Leibowitz S.G., Vining K.C. Temporal connectivity in a prairie pothole complex. *Wetlands*, 2003, vol. 23, no. 1, pp. 13–25.
- Lenters J.D., Kratz T.K., Bowser C.J. Effects of climate variability on lake evaporation: Results from a longterm energy budget study of Sparkling Lake, northern Wisconsin (USA). *J. Hydrol.*, 2005, vol. 308, pp. 168–195.  
<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.10.028>
- McFeeters S.K. The use of normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *Int. J. Remote Sens.*, 1996, vol. 17, pp. 1425–1432.  
<https://doi.org/10.1080/01431169608948714>
- Mikkola K. A remote sensing analysis of vegetation damage around metal smelters in the Kola Peninsula, Russia. *Int. J. Remote Sens.*, 1996, vol. 17, pp. 3675–3690.  
<https://doi.org/10.1080/01431169608949177>
- Obzor ekologicheskogo sostoyaniya ozera Chany (Zapadnaya Sibir')* [Chay Lake (Western Siberia) Environmental Profile]. Vasil'ev O.F., Veen J., Eds. Novosibirsk: GEO Publ., 2015. 255 p.
- Orlova I.V. Problems of irrigation development in Altai Krai and issues of its environmental safety. *Polzunovskii Vestn.*, 2011, no. 4-2, pp. 93–97. (In Russ.).
- Ozesmi S.L., Bauer M.E. Satellite remote sensing of wetlands. *Wetl. Ecol. Manag.*, 2002, vol. 10, no. 5, pp. 381–402.  
<https://doi.org/10.1023/A:1020908432489>
- Prishchepov A.V., Radeloff V.C., Baumann M., Kuemmerle T., Müller D. Effects of institutional changes on land use: agricultural land abandonment during the transition from state-command to market-driven economies in post-Soviet Eastern Europe. *Environ. Res. Lett.*, 2012, vol. 7, pp. 1–13.  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/7/2/024021>
- Sada R., Schmalz B., Kiesel J., Fohrer N. Projected changes in climate and hydrological regimes of the Western Siberian lowlands. *Environ. Earth Sci.*, 2019, vol. 78, no. 2, pp. 1–15.  
<https://doi.org/10.1007/s12665-019-8047-0>
- Shaw D.A., van der Kamp G., Conly F.M., Pietroniro A., Martz L. The fill-and-spill hydrology of prairie wetland complexes during drought and deluge. *Hydrol. Process.*, 2012, vol. 26, pp. 3147–3156.  
<https://doi.org/10.1002/hyp.8390>
- Shulgina T.M., Genina E.Yu., Gordov E.P. Dynamics of climatic characteristics influencing vegetation in Siberia. *Environ. Res. Lett.*, 2011, vol. 6, no. 4, pp. 1–7.  
<https://doi.org/10.1088/1748-9326/6/4/045210>
- Silio-Calzada A., Barquín J., Huszar V.L.M., Mazzeo N., Méndez F., Álvarez-Martínez J.M. Long-term dynamics of a floodplain shallow lake in the Pantanal wetland: Is it all about climate? *Sci. Total Environ.*, 2017, vols. 605–606, pp. 527–540.  
<https://doi.org/10.1016/j.SCITOTENV.2017.06.183>
- Svoboda M., Hayes M., Wood D. *Standardized Precipitation Index User Guide*. Geneva: World Meteorological Organization, 2012. 24 p.
- Thornthwaite C.W. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, 1948, vol. 38, pp. 55–94.  
<https://doi.org/10.2307/2107309>
- Tiner R.W. Geographically isolated wetlands of the United States. *Wetlands*, 2003, vol. 23, no. 3, pp. 494–516.  
[https://doi.org/10.1672/0277-5212\(2003\)023\[0494:GIWOTU\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1672/0277-5212(2003)023[0494:GIWOTU]2.0.CO;2)
- Vicente-Serrano S.M., Beguería S., López-Moreno J.I. A multiscale drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index. *J. Climate*, 2010, vol. 23, no. 7, pp. 1696–1718.  
<https://doi.org/10.1175/2009JCLI2909.1>
- Walker D.A., Acevedo W. *Vegetation and a Landsat-Derived Land Cover Map of the Beechey Point Quadrangle, Arctic Coastal Plain, Alaska*. CRREL Report 87–5. Hanover, NH: U.S. Army Cold Regions Engineering and Research Laboratory, 1987. 63 p.
- Zhang J., Ding J., Wu P., Tan J., Huang S., Teng D., Chen W. Assessing arid inland lake watershed area and vegetation response to multiple temporal scales of drought across the Ebinur lake watershed. *Sci. Rep.*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 1–17.  
<https://doi.org/10.1038/s41598-020-57898-8>