

Классификация пойменных земель Нижней Волги на основе многолетних данных дистанционного зондирования и гидрологической информации

С. С. Шинкаренко, С. А. Барталев, М. А. Богодухов,
И. И. Ворушилов, И. А. Сайгин

*Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия
E-mail: shrinkarenko@d902.iki.rssi.ru*

Меняющийся климат вместе с зарегулированием речного стока приводят к существенным изменениям гидрологического режима пойменных ландшафтов. Одним из проявлений этого становится сокращение амплитуды уровня воды, продолжительности и частоты половодья, что вызывает уменьшение заливаемых площадей. Периодическое затопление пойменных земель — важнейший фактор функционирования как наземных, так и водных экосистем. Волго-Ахтубинская пойма и дельта Волги представляют единственными территориями засушливой зоны России, где практически ежегодно отмечаются разливы при половодьях в весенний период. Цель исследования заключается в картографировании пойменных земель Нижней Волги на основе информационных продуктов тематической обработки данных дистанционного зондирования Земли спутниковой системой Landsat и гидрологической информации (максимального расхода воды и длительности половодья) за 1984–2021 гг. Частота фиксации сезонных изменений водной поверхности спутниковыми системами оптического диапазона зависит от количества безоблачных наблюдений и периодичности съёмки. Установленные связи гидрологических характеристик и площади разливов при половодьях позволили скорректировать их с достаточной точностью ($СКО = 4,9 \%$, $R^2 = 0,63$). В настоящее время только 30 % территории Волго-Ахтубинской поймы и дельты Волги могут заливаться при существующем гидрологическом режиме, при этом высокий уровень поймы практически перестал затопляться. Полученные результаты могут использоваться в ландшафтно-экологических исследованиях, а также для прогнозирования затоплений участков поймы при разных гидрологических условиях.

Ключевые слова: Нижняя Волга, дистанционное зондирование, пойменные земли, затопление, картографирование, гидрологический режим

Одобрена к печати: 14.04.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-119-135

Введение

Климатические изменения последних десятилетий приводят к сокращению и сезонному перераспределению речного стока, что в совокупности с гидротехническим зарегулированием приводит к изменениям в пойменных ландшафтах бассейнов Волги (Болгов и др., 2017; Лобойко и др., 2018; Golub et al., 2020; Kuzmina et al., 2018; Shumova, 2014), Дона (Kuzmina et al., 2022; Solodovnikov, Shinkarenko, 2020), рек Средней Азии (Kuzmina et al., 2019), Западной Европы и других (Кузьмина, Трешкин, 2017). Сокращение длительности и уровня амплитуды половодий в пойменных ландшафтах зоны недостаточного увлажнения приводит к накоплению солей в зоне аэрации, стабилизации уровней грунтовых вод, что влечёт смену видового состава пойменных фитоценозов (Kuzmina et al., 2018). Из-за климатических изменений, низконапорных гидротехнических сооружений и перераспределения стока Дона в интересах судоходства в его нижнем течении практически прекратились весенние разливы в период половодья: после 1994 г. небольшие площади заливаний отмечены только в отдельные годы (Kuzmina et al., 2022). На малых реках степной зоны половодья также редки (Solodovnikov, Shinkarenko, 2020), из-за чего стали носить характер стихийных бедствий, поскольку ранее регулярно заливаемые земли застраиваются и хозяйственно осваиваются.

Река Волга в нижнем течении (ниже Волгоградского гидроузла) считается единственной в засушливой зоне России, которая практически ежегодно разливается при половодьях, обра-

зую обширную Волго-Ахтубинскую пойму (ВАП). Это играет огромную роль в функционировании как водных, так и наземных пойменных экосистем. Разливы становятся нерестилищами для рыб, от половодья зависит наполнение пойменных озёр и ериков, питание грунтовых вод, увлажнение почв. Сезонные колебания грунтовых вод, периодическое промывание водной зоны аэрации от накопившихся солей необходимы для поддержания аборигенных растительных сообществ. Насыщение грунтовых и поверхностных вод требуется для обеспечения проживания в пойме населения и ведения орошаемого сельского хозяйства (Bolgov et al., 2018). Установлено также влияние гидрологических характеристик и на горимость пойменных ландшафтов Нижней Волги (Шинкаренко и др., 2022).

Таким образом, картографирование водного зеркала в поймах при разливах рек крайне важно как для проведения ландшафтно-экологических исследований, так и для оценки угрозы объектам инфраструктуры, которые могут попадать в зоны затоплений. В северной части ВАП планируется постройка комплекса гидротехнических сооружений на р. Ахтубе, которые повлияют на поступление воды в пойму (Bolgov et al., 2019). Также уже проводятся работы по расчистке русел ериков и постройке плотин в ВАП. Картографирование водного зеркала до и после ввода гидротехнических сооружений в эксплуатацию в дальнейшем поможет определить изменения в гидрологическом режиме поймы, вызванные реализацией данных мероприятий.

Одним из инструментов картографирования пойменных экосистем и динамики площадей водных объектов выступают технологии дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса (Барталев и др., 2016). Спутниковые данные достаточно широко используются для картографирования не только водных объектов, но и прилегающих к ним прибрежных зон (Курбатова, 2012) и пойменных ландшафтов (Кутузов, 2011; Рулев и др., 2017). Также одним из направлений использования данных ДЗЗ стало сопоставление площадей водоёмов и гидрологических характеристик, что даёт возможность затем определять уровень озёр (Кашницкая, 2021), объём воды в водохранилищах (Шинкаренко и др., 2021б) или величину расхода в реке (Мухаметджанов и др., 2022). Наряду с данными ДЗЗ для картографирования площадей разливов применяются методы гидродинамического моделирования (например, (Isaeva et al., 2022)). Для построения соответствующих моделей требуются цифровые модели рельефа высокой точности, которые отсутствуют в открытом доступе, что существенно сокращает возможности использования этого подхода (Бубер и др., 2017). Существующие глобальные информационные продукты, основанные на спутниковых данных достаточного разрешения, создают предпосылки для определения площадей затопления при различных гидрологических условиях. Одним из таких информационных продуктов является Global Surface Water (GSW) разрешения 30 м, представляющий данные о сезонных и постоянных площадях водной поверхности за 1984–2021 гг., выделенных с достаточно высокой точностью по данным Landsat (Pekel et al., 2016).

Цель настоящего исследования состоит в классификации пойменных ландшафтов Нижней Волги по периодичности затопления при половодьях и необходимым для этого гидрологическим характеристикам. Для достижения этой цели были решены следующие задачи: картографирование водного зеркала по данным GSW за 1984–2021 гг.; определение достаточного максимального расхода и объёма сброса воды через Волгоградский гидроузел для каждого пикселя раstra GSW, соответствующего водной поверхности; корректировка площади разливов по GSW на основе гидрологических данных; определение частоты заливаний при половодьях.

Материалы и методы

Территория исследований включает Волго-Ахтубинскую пойму и дельту Волги с учётом ильменно-бугровых ландшафтов общей площадью около 3 млн га (в том числе 0,4–0,8 млн га постоянной водной поверхности в зависимости от границы переднего края дельты Волги на каспийском взморье). Природные условия Нижней Волги хорошо изучены (например,

(Болгов и др., 2017; Кривошей, 2015; Лобойко и др., 2018; Bolgov, Demin, 2018; Golub et al., 2020; Kuzmina et al., 2018; Shumova, 2014)), поэтому в данной статье не приводятся. Пойма Волги в нижнем течении расположена на территории трёх регионов России (Астраханская, Волгоградская области, Республика Калмыкия) и Атырауской обл. Казахстана. В соответствии с особенностями рельефа и гидрологическими условиями территорию исследований разделяют на четыре относительно однородных гидролого-геоморфологических района (Kuzmina et al., 2018): 1 — от Волгоградского гидроузла до пос. Чёрный Яр (северная часть ВАП); 2 — от пос. Чёрный Яр до с. Верхнелебяжье (центральная часть ВАП); 3 — дельта Волги; 4 — ильменно-бугровой район (западные и восточные подступные ильмени) (рис. 1).

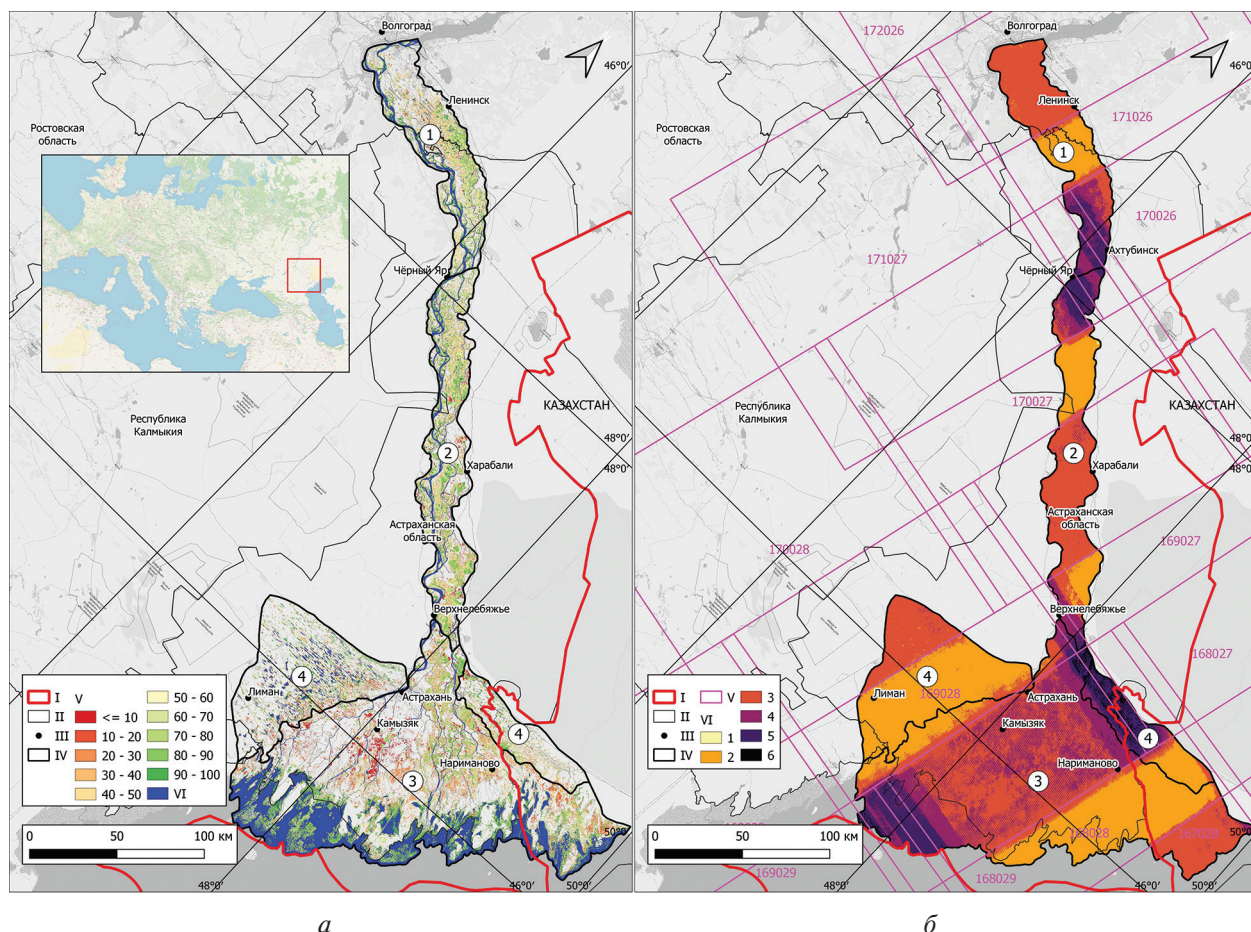


Рис. 1. Территория исследований (а): I — государственная граница РФ; II — границы регионов; III — населённые пункты; IV — границы гидролого-геоморфологических районов (1–4 — номера районов); V — повторяемость затопления за 1984–2021 гг. по данным GSW, %; VI — постоянные водотоки и водоёмы по данным GSW. Среднемноголетнее количество наблюдений в период половодья спутниками Landsat за 2001–2021 гг. (б): V — тайлы Landsat; VI — количество наблюдений

Картографирование водного зеркала выполнено по данным глобального информационного продукта Global Surface Water (GSW), основанного на спутниковых изображениях Landsat-5, -7, -8 за 1984–2021 гг. (Pekel et al., 2016). В состав этого информационного продукта входит набор ежегодных и ежемесячных электронных карт постоянного и временного положения зеркала поверхностных вод, а также максимальный охват водной поверхности, включающий весь период наблюдений и многолетние данные о повторяемости заливаний с учётом годовой и сезонной динамики (см. рис. 1а). Всего за 1984–2021 гг. на территорию исследований доступно 11 522 изображения (13 тайлов) Landsat-5 TM (англ. Thematic Mapper), Landsat-7 ETM+ (англ. Enhanced Thematic Mapper Plus), Landsat-8 OLI (англ. Operational Land

Imager), в том числе 1047 — на май (см. *рис. 1б*), когда чаще всего наблюдается пик половодья (среднемноголетняя дата начала пика половодья — 11 мая (Shumova, 2014)).

По оценке разработчиков данных GSW, ошибки ложного определения водного зеркала составляют 0,9–1,2 % для сезонных изменений и 0,3–0,5 % для постоянных водоёмов в зависимости от используемого источника данных. Доля пропусков (ошибки оmissии), вызванная облачностью и недостаточной частотой съёмки, составляет 22,6–26,2 и 1,2–1,5 % для сезонных и постоянных площадей водоёмов соответственно (Pekel et al., 2016).

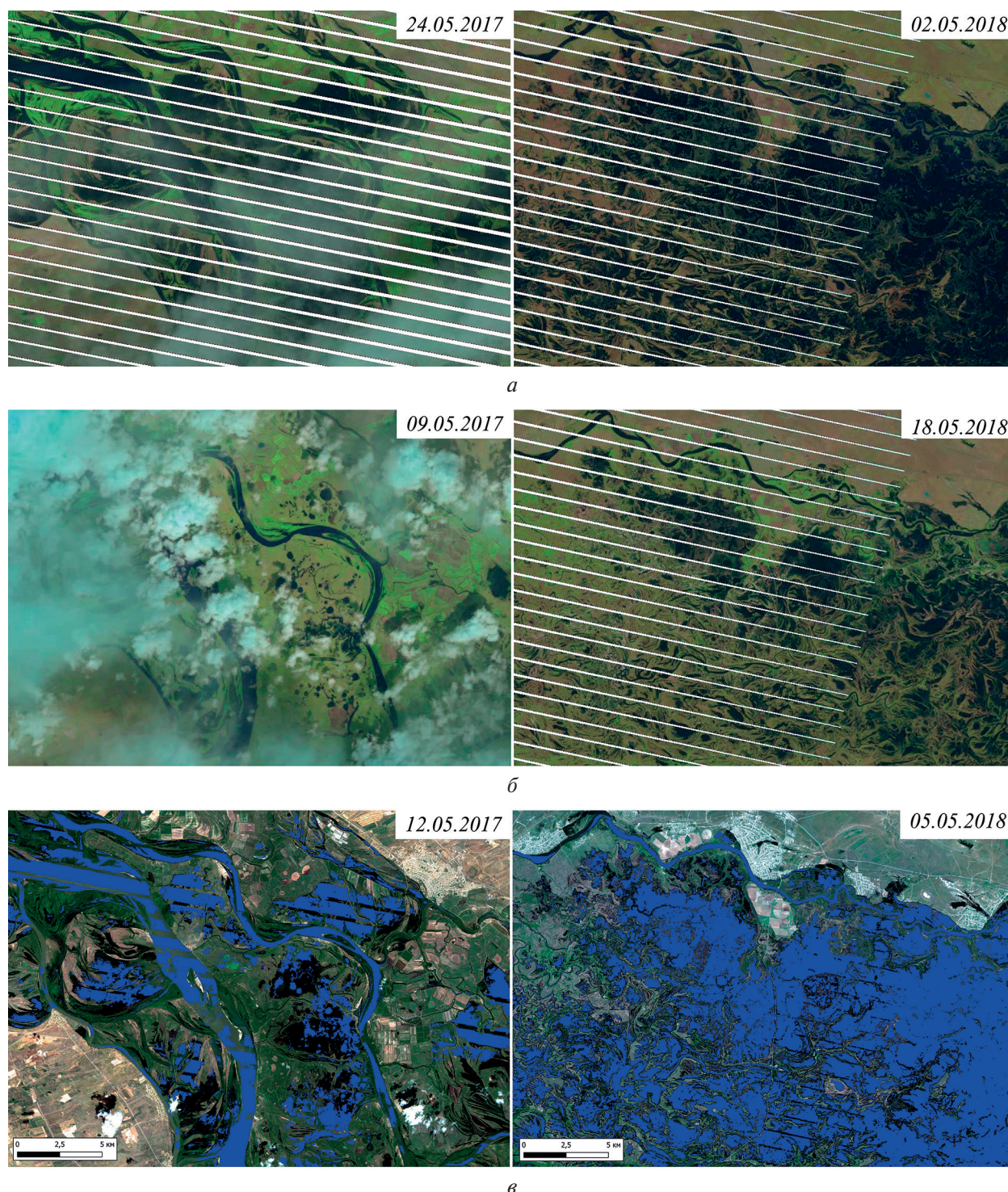


Рис. 2. Спутниковые изображения половодья в Волго-Ахтубинской пойме в окрестностях г. Харабали (слева) и г. Ленинска (справа): *а* — близкие к пику половодья даты; *б* — даты до или после пика половодья; *в* — сопоставление данных GSW (синий цвет) с изображениями Sentinel-2

Большие ошибки определения сезонных изменений площади водного зеркала в сравнении с постоянными водоёмами связаны с необходимостью регулярных наблюдений, что может быть затруднено из-за облачности и относительно низкого временного разрешения использованных спутниковых данных Landsat. Из-за этого краткосрочные подъёмы уровня воды и соответствующие колебания водного зеркала могут быть пропущены. Тем не менее общая площадь периодически заливаемых земель за 1984–2021 гг. по данным GSW определена достаточно точно, так как используется многолетний архив данных Landsat, соответственно имеется довольно возможностей для фиксации сезонных изменений водного зеркала в каждом пикселе.

Из-за облачности количество пригодных спутниковых изображений снижается, поэтому период весеннего половодья в ВАП и дельте Волги (конец апреля – начало июня) охватывается недостаточно. На *рис. 2* (см. с. 122) показаны примеры спутниковых изображений в период максимального расхода воды через Волгоградский гидроузел и результат картографирования водного зеркала по данным GSW. Даже при наличии достаточного количества безоблачных изображений (например, в 2018 г.) отмечен недоучёт площади водной поверхности, связанный с несовпадением дат спутниковой съёмки и максимального уровня воды.

Для состояния пойменных ландшафтов гидрологический режим выступает одним из ключевых факторов, поскольку они сформированы в условиях периодических заливаний при половодьях и паводках. Поэтому крайне важно определять не только сам факт наличия водной поверхности на данной территории в ретроспективе, но и периодичность ежегодных заливаний. Для этого необходимы данные о площади сезонных изменений водного зеркала в каждом году. Периодичность спутниковой съёмки Landsat в 1984–2021 гг. составляла от 8 до 16 дней, что недостаточно для фиксации максимальной площади водного зеркала на пике половодья на Нижней Волге, который может продолжаться не более 5–7 дней (Лобойко и др., 2018). Зависимость частоты наблюдений водного зеркала от количества безоблачных спутниковых наблюдений подтверждается *рис. 3*.

Радарные данные, в отличие от оптических, менее подвержены влиянию состояния атмосферы и облачности, поэтому широко используются для картографирования различных компонентов водно-болотных угодий, в том числе и водного зеркала (Mahdianpari et al., 2020). При этом проблема недостаточного временного разрешения для фиксации пика половодья характерна и для радарных данных необходимого пространственного разрешения (Adeli et al., 2020). Также временной многолетний ряд открытых однородных радарных данных имеет существенно меньшую длину по сравнению с архивом Landsat. Радарные данные очень чувствительны к влажности почвы (White et al., 2015) и ряби на водной поверхности (Zhang et al., 2016), что может приводить к неопределённости при картографировании водного зеркала. По этим причинам в данном исследовании использовались только оптические данные Landsat.

Для решения проблемы отсутствия необходимого количества оптических спутниковых наблюдений при картографировании максимальной годовой площади водного зеркала в речных поймах возможно комбинирование данных дистанционного зондирования Земли и гидрологической информации: площадь водной поверхности зависит от уровня воды в реке, связанного с величиной расхода воды (Рулев и др., 2017).

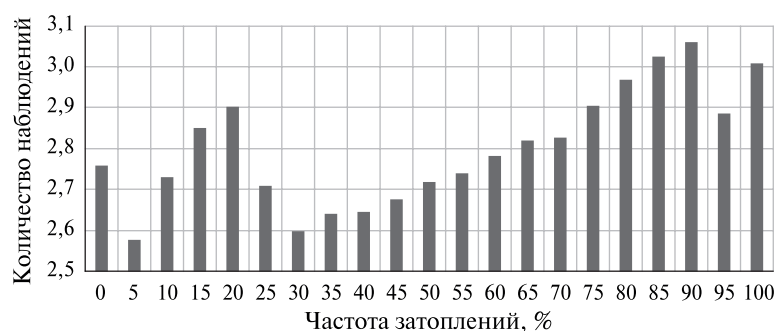


Рис. 3. Связь частоты затоплений по данным GSW и среднемноголетнего количества безоблачных спутниковых наблюдений в период половодья за 2001–2021 гг.

Таким образом, на основе многолетних карт максимальной площади водного зеркала, максимальных расходов воды и продолжительности периода половодья возможно составление карты величин указанных гидрологических характеристик, достаточных для заливания соответствующего участка.

Определение величин максимальных расходов воды и сброса воды через Волгоградский гидроузел за период пика половодья производилось на основе ежегодных растровых карт максимальной площади водного зеркала GSW за период 1984–2021 гг., где каждому пикселю на каждый год присваивались значения максимального расхода и сброса воды за период пика половодья за этот год. Таким образом было получено два набора из 38 растровых изображений, отражающих расходы и сбросы воды за период 1984–2021 гг., после чего для каждого пикселя было выбрано минимальное значение в ряду. Поскольку для достижения наибольшей величины площади водного зеркала недостаточно только определённого значения расходов или сбросов воды (Рулев и др., 2017), то к водной поверхности по гидрологическим данным относились только те пиксели раstra, в которых были превышены значения и расходов, и сбросов. Схема картографирования скорректированного по гидрологическим данным водного зеркала показана на *рис. 4*.

Расходы воды в створе Волгоградского гидроузла, длительности и уровни половодья и периодов максимальных расходов воды приведены согласно работам (Кривошей, 2015; Лобойко и др., 2018), а также информации с официального сайта РусГидро (<http://www.rushydro.ru/hydrology/informer>) и Государственного водного реестра (<https://gis.favr.ru/web/guest/opendata>), находящейся в открытом доступе. Возможность анализа влияния уровней воды на площадь водного зеркала ограничена наличием соответствующих гидрологических данных, отсутствующих в открытом доступе. Государственный водный реестр содержит сведения о максимальных уровнях только с 2017 г., в то время как ежедневные данные о расходах воды через Волгоградский гидроузел публикуются на официальном сайте РусГидро (<https://rushydro.ru/>). По этой причине в настоящем исследовании используются преимущественно данные о расходах в створе Волжской гидроэлектростанции, а не уровни воды.



Рис. 4. Схема картографирования водного зеркала по данным ДЗЗ с корректировкой по гидрологическим данным максимального расхода и сброса воды на пике половодья

Поскольку в ВАП и дельте Волги распространены обвалованные орошаемые земли и пруды, которые периодически заполняются водой искусственно (Балдина, Трошко, 2016; Васильченко, 2022), то эта категория земель была предварительно картографирована на основе экспертного дешифрирования спутниковых данных Sentinel-2 и исключена из анализа. Связь гидрологических характеристик и площадей водного зеркала проанализирована за период 2000–2021 гг., так как до 1999 г. функционировал только один спутник Landsat-5, из-за чего в отдельные годы полностью отсутствуют безоблачные изображения на территорию исследований.

Результаты и обсуждение

Общая площадь заливаемых земель в пойменных ландшафтах Нижней Волги по данным GSW за 1984–2021 гг. составляет всего 30 % территории. Таким образом, в настоящее время из пойменного режима вышла большая часть заливаемых ранее в половодье земель. Одна из причин — зарегулирование речного стока, из-за чего снижаются длительность и максимальные расходы половодья (Kuzmina et al., 2018), с другой стороны — климатические изменения, которые приводят к перераспределению речного стока с весны на период летней и зимней межени (Shumova, 2014). Подобные тенденции отмечены не только на Нижней Волге, но и в пойменных ландшафтах Среднего и Нижнего Дона (Kuzmina et al., 2022; Solodovnikov, Shinkarenko, 2020), Сырдарьи и других рек (Kuzmina et al., 2019). Кроме того, существенные площади были обвалованы для организации орошаемого сельскохозяйственного производства, отрезаны дамбами и дорогами, что также способствовало их выводу из пойменного режима (Васильченко, 2022).

Наибольшая доля заливаемых земель (48 %) относится ко второму гидролого-геоморфологическому району (центральная часть ВАП), который в меньшей степени антропогенно-преобразован, а его рельеф относительно ровный с небольшим количеством прирусловых валов и грив (Кривошей, 2015). К постоянным водоёмам здесь относится 10 % площади. В ильменно-бугровом районе регулярно заливается только 18 % территории (постоянные водоёмы занимают всего 4 % площади), что связано с большим количеством возвышенных участков (бэровских бугров), также с антропогенным регулированием поступления воды, снижением водности половодья и падением уровня Каспия, которые приводят к сокращению площади озёр-ильменей (Шинкаренко и др., 2021а). В дельте Волги пойменный режим сохраняется на 29 % площади, ещё 18 % здесь представлено постоянными водотоками и водоёмами. Центральная часть дельты Волги наиболее хозяйственно освоена, также здесь встречаются бэровские бугры, не заливаемые в половодье даже самых высоких уровней (Балдина, Трошко, 2016; Занозин и др., 2020). В дельтовой части широко распространены обширные тростниковые заросли, которые могут маскировать водное зеркало, из-за чего площадь с сезонным заливанием водой в реальности выше, чем определяемая по оптическим данным ДЗЗ. В северной части ВАП к современной заливаемой пойме можно отнести 39 % площади, ещё 10 % представлены постоянными водоёмами и водотоками. Здесь относительно велика доля лесов (Васильченко, 2022), которые, так же как высокая околородная растительность, могут перекрывать водное зеркало при половодье, из-за чего оценки площади заливания по оптическим данным могут быть занижены. Но поскольку большая часть древостоев приурочена к возвышениям — прирусловым валам и гривам, очень редко заливаемым в половодье (Kuzmina et al., 2018), то возможная связанная с этим фактором неопределённость несущественна.

Коэффициент корреляции между площадью затопления и максимальным расходом половодья составляет $r = 0,70$ ($p < 0,001$), для объёма сброса за пик половодья $r = 0,72$ ($p < 0,001$). Для отдельных гидролого-геоморфологических районов связь между площадью разлива воды в половодье с гидрологическими характеристиками неоднородна: для северной и центральной частей ВАП большую роль играет объём сброса за пик половодья ($r = 0,78$ и $r = 0,70$ соответственно, $p < 0,001$), для дельты Волги и подстепных ильменей важнее максимальный

расход ($r = 0,64$ и $r = 0,56$ соответственно, $p < 0,01$). Это связано с особенностями рельефа: по мере продвижения вниз по течению к югу высотные отметки поймы снижаются, поэтому длительность периода максимальных сбросов воды может быть не так важна, так как для заливания поймы дельты Волги требуется меньший уровень воды в реке (Кривошей, 2015). В северной части ВАП, наоборот, из-за грядистого рельефа часто наблюдается подъём уровня без значительного увеличения площади водного зеркала, из-за чего требуется увеличение не только расходов половодья, но и его длительности (Рулев и др., 2017). Со среднемесячным расходом, объёмом сброса воды за отдельные месяцы или весь период половодья значимой связи площади водной поверхности не установлено.

Отмечена значимая связь площади разлива с уровнем воды по некоторым гидрологическим постам: например, в дельте Волги коэффициент корреляции с величинами максимального годового уровня в Волге в Астрахани в 2015–2022 гг. $r = 0,93$ ($p < 0,05$). Для ВАП характерна наиболее сильная связь с максимальным уровнем за 1984–2020 гг. в р. Ахтубе по гидропосту г. Ленинска: $r = 0,72$ ($p < 0,01$), в то время как с уровнями в Волге в Волгограде связь слабее ($r = 0,63$, $p < 0,01$). Заполнение водой ВАП при половодье происходит из Ахтубы, которая в северной части поймы имеет более высокие отметки, чем Волга, поэтому именно уровень в Ахтубе определяет гидрологический режим северной части ВАП (Кривошей, 2015; Bolgov et al., 2018). В настоящее время ведётся проектирование гидроузла на Ахтубе для управления поступлением воды в пойму (Bolgov et al., 2019), поэтому спутниковый мониторинг изменений площади водного зеркала важен для оценки последствий зарегулирования русла этого волжского рукава.

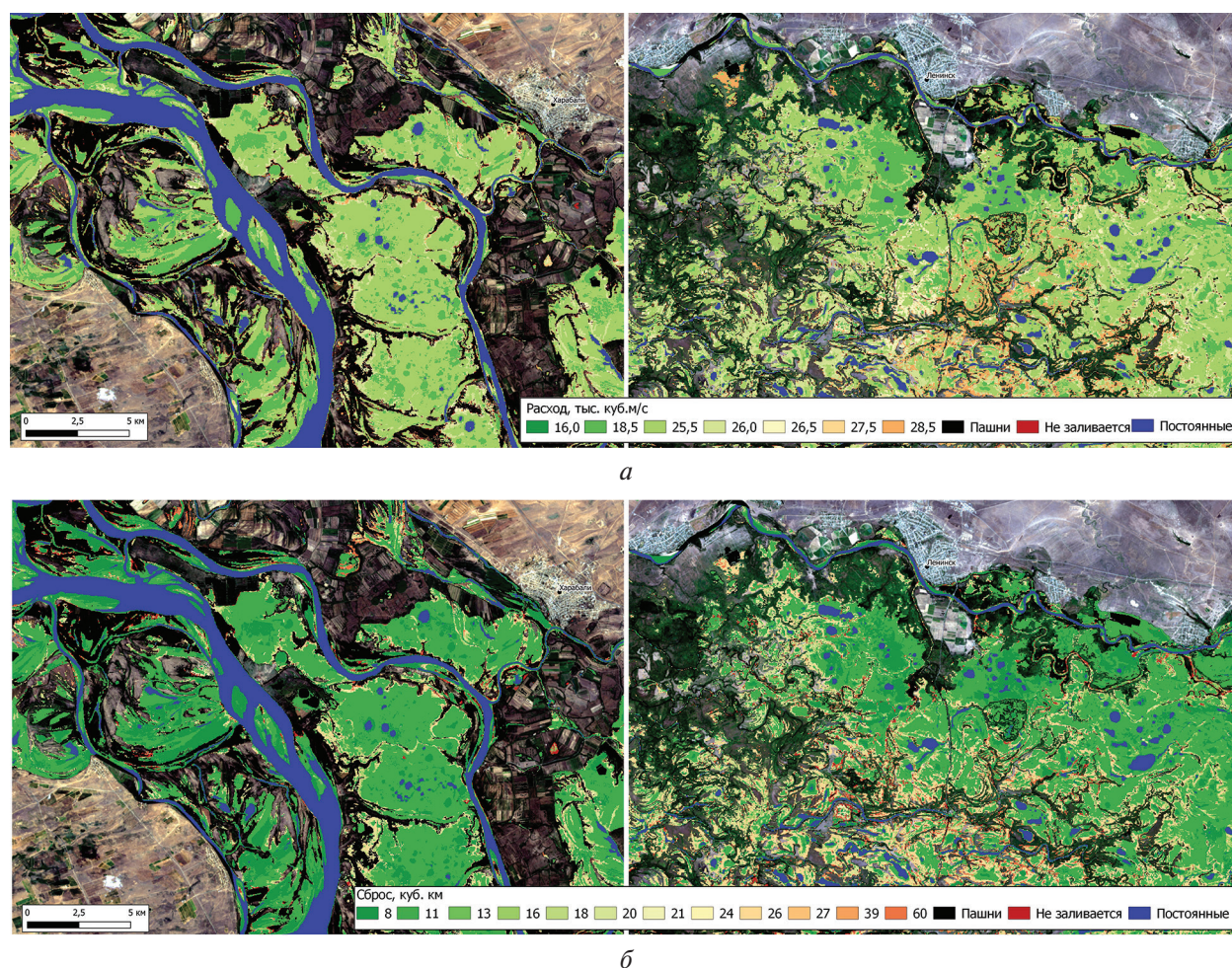


Рис. 5. Результат определения достаточных для затопления поймы максимального расхода воды (а) и объёма сброса воды (б) через Волгоградский гидроузел в окрестностях г. Харабали (слева) и г. Ленинска (справа)

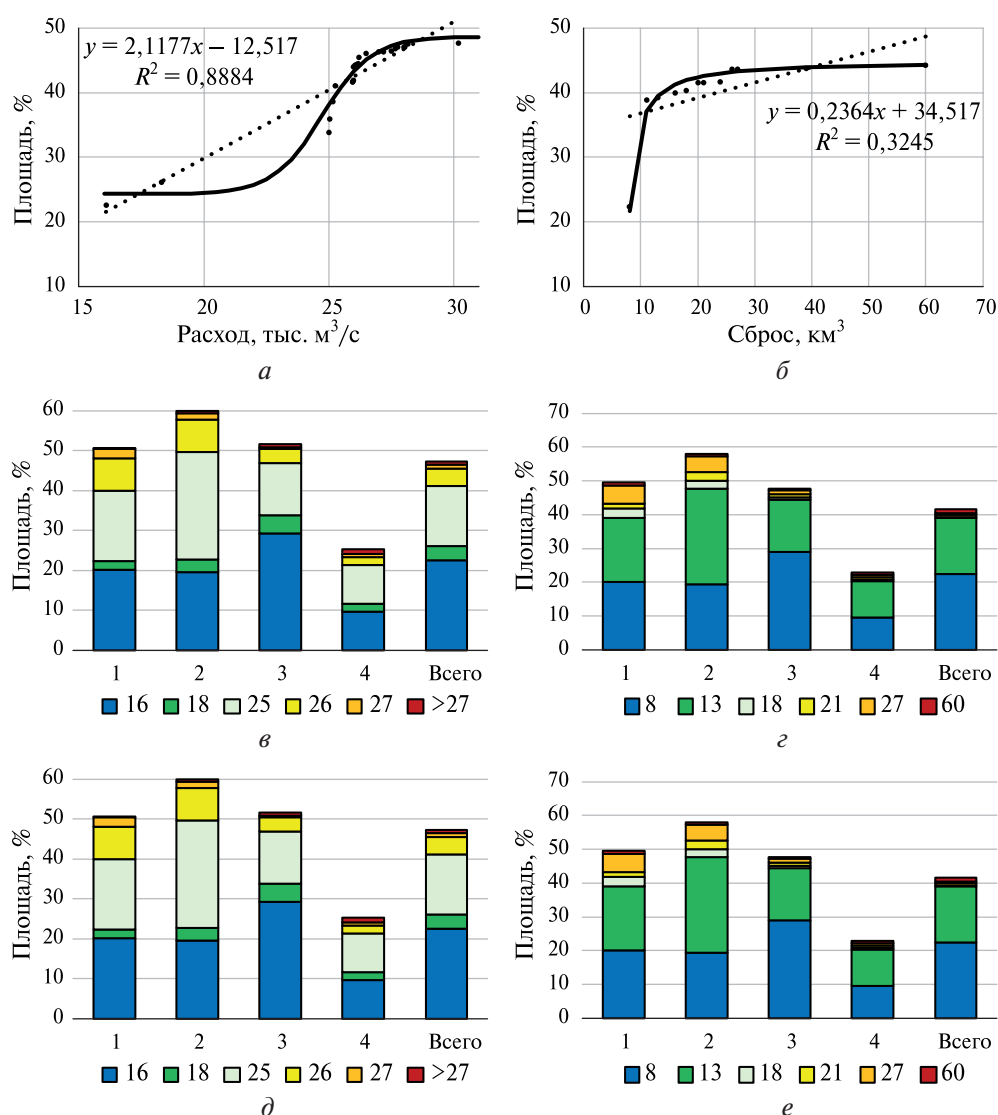


Рис. 6. Связь площади водного зеркала и максимального расхода воды (а), сброса за период максимального расхода воды (б), площади водного зеркала при разных значениях максимального расхода (в) и сброса воды (г) за период половодья, распределение территории по высотному уровню поймы по GSW (д) и с учётом коррекции по гидрологическим данным. I — высокая пойма; II — средняя пойма; III — низкая пойма; IV — прирусловая пойма; V — постоянные водоёмы; VI — не заливается. 1–4 — номера гидролого-геоморфологических районов

Результат определения достаточного максимального расхода и сброса воды за период пика половодья показан на рис. 5 (см. с. 126), также установлена связь между площадью водного зеркала и гидрологическими характеристиками (рис. 6), которая характеризуется логистической функцией с $R^2 = 0,94$ и среднеквадратичной ошибкой СКО = 1,36 % для максимального расхода (см. рис. 6а) и $R^2 = 0,98$ и СКО = 0,99 % для объёмов сброса (см. рис. 6б) за период пика половодья через Волгоградский гидроузел. Значительная часть площади водного зеркала, обеспечиваемая наименьшими значениями максимального расхода и сброса воды, является постоянной гидрографической сетью (русло Волги и её рукава, озёра: 13,6 % площади) и самой низкой частью поймы — прирусловой, включающей также песчаные косы и острова (см. рис. 6в–е).

Для заливания большей части современной поймы необходим максимальный расход в створе Волгоградского гидроузла не менее 25–26 тыс. м³/с. Увеличение максимального расхода более 27 тыс. м³/с в современных условиях недостаточной продолжительности пиков половодья не приводит к существенному росту площади разливов по данным GSW.

Одной из причин этого может быть низкая повторяемость половодий с максимальным расходом более 27–28 тыс. м³/с, что приводит к недостатку спутниковых наблюдений площади водного зеркала при таких расходах воды. Подобные гидрологические условия отмечены в 1985–1988, 1991–1995, 2001, 2005 и 2016 гг. Таким образом, большая часть многоводных лет приходится на период функционирования только одного спутника Landsat-5 (до запуска Landsat-7 в 1999 г.), из-за чего периодичность съёмки составляла 16 дней. В результате возможности для фиксации водного зеркала данным спутником на пике половодья были ограничены из-за низкой частоты наблюдений, к тому же часть из них проводилась в облачную погоду. Скорость подъёма уровня воды на пике половодья у Волгограда составляет 33 см/сут, а на спаде — 19 см/сут (Shumova, 2014). Поэтому за период между спутниковыми съёмками возможно достижение максимального уровня воды и спад до более низких значений. По этой причине можно предполагать несколько большую площадь водной поверхности при максимальном расходе более 28 тыс. м³/с, которая не была зафиксирована спутником Landsat-5 из-за низкого временного разрешения. В 2001 и 2005 гг., несмотря на два спутника Landsat-5, -7 и частоту съёмки в 8 дней, на большей части территории было не более двух безоблачных наблюдений за период половодья (рис. 7). Таким образом, только в 2016 г. были условия для картографирования максимальной площади разлива, поскольку максимальный расход составил 27,8 тыс. м³/с, а продолжительность пика половодья — 25 сут.

Площадь водной поверхности по данным GSW связана с максимальным расходом и объёмом сброса воды за половодье следующим уравнением (см. рис. 7а):

$$S = 0,725Q + 0,135V + 9,52,$$

где S — доля площади, занятая водой, %; Q — максимальный расход, тыс. м³/с; V — объём стока за пик половодья, км³; $R = 0,88$; СКО = 1,74 %.

На основе выявленных зависимостей возможно прогнозирование площади заливания при половодьях по данным о гидрологических условиях. Тем не менее интерес представляет не просто оценка площади разлива, но и картографирование заливаемых участков. С помощью метода, представленного на рис. 4, были построены карты и определены площади водного зеркала за период 2000–2021 гг. (см. рис. 7, см. с. 129). Среднеквадратичная ошибка в сравнении с данными GSW составила 7,7 % ($R^2 = 0,67$). Поскольку для информационного продукта GSW характерны ошибки пропуска водных объектов на уровне 24–26 % (Pekel et al., 2016), то также была проанализирована точность полученных оценок на основе гидрологических данных и GSW с учётом указанных ошибок. Среднеквадратичная ошибка в таком случае снизилась до 4,9 % при сопоставимом коэффициенте детерминации $R^2 = 0,63$. Площадь разлива зависит не только от максимальных расходов воды половодья и его длительности, но и от гидрологических условий, предшествующих половодью, что является источником неопределённости для полученных оценок.

По данным GSW к высокому уровню поймы (заливается реже, чем раз в 10 лет) можно отнести 2,2 % площади (см. рис. 6д), ещё 11,2 % относятся к средней пойме (заливание каждые 3–10 лет) и 15,4 % — к низкой пойме (заливание каждые два года и чаще). Также 1,9 % выступают прирусловой поймой и ещё 13,6 % представлены постоянными водоёмами и руслами. С учётом корректировки площадей водного зеркала GSW по гидрологическим данным (см. рис. 6е) высокая пойма занимает не более 0,5 % территории, а средняя — 3,4 %. Наиболее представлены низкая (17,9 %) и прирусловая поймы (8,8 %), заливаемые практически ежегодно. Почти полное прекращение заливания верхних уровней поймы и существенное сокращение для средних уровней в ВАП отмечено также и другими исследователями на основе анализа данных об уровнях половодья, рельефе и растительных сообществах (Kuzmina et al., 2018; Shumova, 2014). Условия половодий двух последних десятилетий практически не отличаются величинами максимального расхода воды (за исключением двух маловодных лет — 2006 и 2015 гг.) Многоводные годы характеризуются скорее не большими расходами, а увеличенной продолжительностью пиков половодий (2005, 2016, 2018), что увеличивает длительность разливов (и повышает шанс фиксации спутниковой съёмкой), но существенно не влияет на их площади (Рулев и др., 2017).

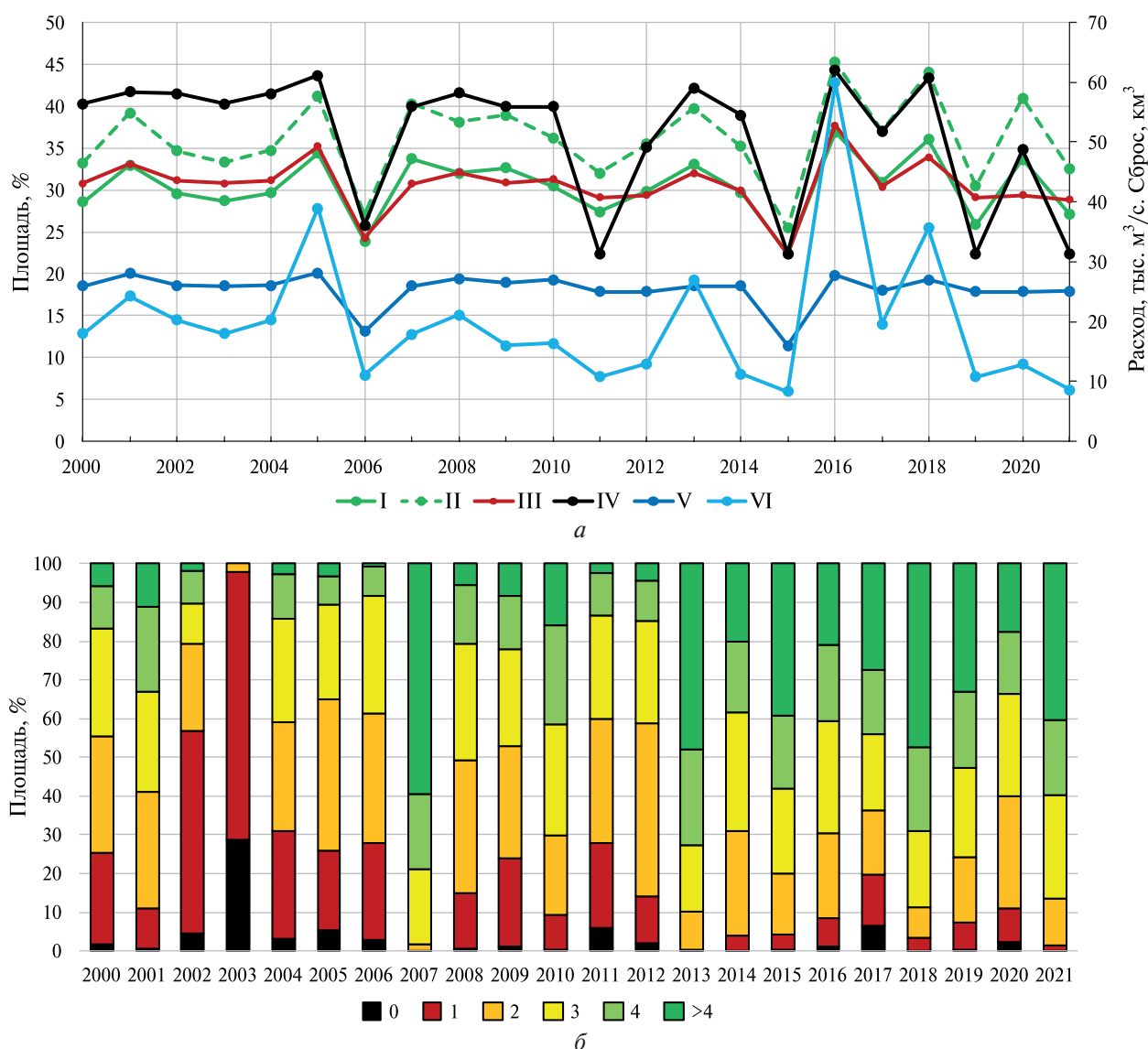


Рис. 7. Многолетняя динамика гидрологических характеристик и площади водного зеркала (а): I — водное зеркало по GSW; II — водное зеркало по GSW с учётом возможных ошибок оmissии; III — линейная регрессия; IV — водное зеркало через расход и сброс половодья; V — максимальный расход воды; VI — сброс за период максимального расхода воды. Охват территории разным количеством безоблачных спутниковых наблюдений Landsat в период половодья (б); 0–4 — количество безоблачных наблюдений

Уровень Каспийского моря достиг минимальных значений к концу 70-х гг. прошлого века (–29 м). На 1984 г. он составлял –28 м, к 1996 г. отмечен подъём Каспия до отметки –26,4 м, после чего началось падение, продолжающееся до сих пор (Рычагов, 2019). На начало 2021 г. уровень составлял –28,3 м (Гинзбург и др., 2021). Кроме изменения уровня приёмного водоёма меняется и глубина врезания речного русла Волги и её рукавов. За период исследований высотные отметки дна могли существенно понизиться из-за вертикальных русловых деформаций. Таким образом, колебания уровня Каспийского моря, существенно влияющие на площадь разливов в дельте Волги при одном и том же расходе воды, и врезание русел могут вносить неопределённость при анализе колебаний площади водной поверхности по гидрологическим данным. Решением этих проблем отчасти может стать использование не только данных о расходе воды, но и об уровне воды в период половодья.

Кроме определения факта заливания водой какой-либо пойменной территории важно определять и длительность стояния воды на пойме, так как этот показатель очень важен для

состояния экосистем (Kuzmina et al., 2018; Shumova, 2014). Выше было показано, что оптические спутниковые данные высокого разрешения не могут в полной мере обеспечить возможности ретроспективного анализа длительности затопления из-за зависимости от облачности и недостаточного временного разрешения. Радиолокационные спутниковые системы высокого пространственного разрешения также не обладают достаточной частотой получения данных, несмотря на независимость от облачного покрова. Также глубина архива однородных открытых радарных данных уступает оптическим. Необходима проработка методов картографирования водного зеркала при половодьях на основе ежедневных данных среднего пространственного разрешения, например MODIS (*англ.* Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) или VIIRS (*англ.* Visible Infrared Imaging Radiometer Suite). Разрешение этих спутниковых систем достаточно для картографирования максимальной площади разливов на пиках половодья. Тем более что существуют технологии, позволяющие восстанавливать ряды спутниковых данных, практически полностью освобождая их от влияния облачности (Миклашевич и др., 2019).

Заключение

В результате исследования получены взаимосвязи гидрологических характеристик половодья на Нижней Волге (максимальный расход и объём сброса воды за период пика половодья) и площади разливов в пойме, определяемых по оптическим данным дистанционного зондирования Земли из космоса за 1984–2021 гг. Частота фиксации сезонных изменений водной поверхности зависит от количества безоблачных наблюдений и периодичности получения спутниковых данных. Также из-за низкой повторяемости многоводных лет могут занижаться площади разливов при больших максимальных расходах половодья. Спутниковые системы оптического диапазона высокого пространственного разрешения имеют недостаточное временное разрешение для точного определения максимальной площади водного зеркала в условиях быстрорастущего уровня воды и повышенной облачности в период весеннего половодья. Тем не менее многолетний архив данных дистанционного зондирования позволяет получить карту пойменных земель.

Установленные связи гидрологических характеристик и площади разливов при половодьях по данным Landsat позволили их скорректировать с достаточной точностью. Таким образом, были разработаны карты пойменных земель, которые заливаются при достижении определённых значений расхода и объёма сброса воды за половодье через Волгоградский гидроузел. В настоящее время только 30 % территории Волго-Ахтубинской поймы и дельты Волги могут заливаться при существующем гидрологическом режиме, при этом высокий уровень поймы практически перестал затопливаться.

Врезание русел, изменения уровня Каспия, предполоводный уровень воды в руслах — все эти факторы влияют на площадь водного зеркала при равных расходах воды и вносят неопределённость в оценки взаимосвязи гидрологических условий и площади разливов по многолетним спутниковым данным наряду с недостаточным количеством безоблачных наблюдений. Решением проблемы повышенной облачности в период половодья могло бы стать использование радарных данных, но это не снимает проблему низкой частоты съёмки спутниковых систем достаточного пространственного разрешения. Перспективной представляется разработка методов картографирования водного зеркала в половодье на основе ежедневных данных MODIS и VIIRS с устранённым влиянием облачности, что позволит также определять и длительность стояния воды на пойме.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 21-77-00018) с использованием инфраструктуры Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг» (Лупян и др., 2015) и возможностей информационного сервиса «Вега» (Lourpian et al., 2022).

Литература

1. Балдина Е. А., Трошко К. А. Картографирование современного состояния и многолетних изменений в использовании сельскохозяйственных земель в дельте Волги // Геодезия и картография. 2016. № 11. С. 39–46. DOI: 10.22389/0016-7126-2016-917-11-39-46.
2. Барталев С. А., Егоров В. А., Жарко В. О., Лупян Е. А., Плотников Д. Е., Хвостиков С. А., Шабанов Н. В. Спутниковое картографирование растительного покрова России. М.: ИКИ РАН, 2016. 208 с.
3. Болгов М. В., Шаталова К. Ю., Горелиц О. В., Землянов И. В. Водно-экологические проблемы Волго-Ахтубинской поймы // Экосистемы: экология и динамика. 2017. Т. 1. № 3. С. 15–37.
4. Бубер А. А., Бородычев В. В., Талызов А. А. Разработка гидродинамической модели дельты реки Волги и Западных подступных ильменей // Изв. Нижневолжского агроуниверситет. комплекса: наука и высшее образование. 2017. № 2(46). С. 271–284.
5. Васильченко А. А. Пространственный анализ инфраструктуры орошаемых полей Волго-Ахтубинской поймы на территории Волгоградской области // Научно-агроном. журн. 2022. № 4(119). С. 12–18. DOI: 10.34736/FNC.2022.119.4.002.12-18.
6. Гинзбург А. И., Костяной А. Г., Серых И. В., Лебедев С. А. Климатические изменения гидрометеорологических параметров Каспийского моря (1980–2020) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 277–291. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291.
7. Занозин В. В., Бармин А. Н., Валов М. В. Применение ГИС и данных ДЗЗ для оценки антропогенного преобразования территории // Вестн. Северо-Восточного федер. ун-та им. М. К. Аммосова. Сер. Науки о Земле. 2020. № 1. С. 27–37. DOI: 10.25587/SVFU.2020.17.61131
8. Кашиницкая М. А. Исследование динамики площадей водной поверхности озёр степной зоны Восточного Забайкалья на основе данных дистанционного зондирования Земли // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 3. С. 242–253. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-242-253.
9. Кривошей В. А. Река Волга (проблемы и решения). М.: ООО «Журнал «РТ», 2015. 92 с.
10. Кузьмина Ж. В., Трешкин С. Е. Методика оценки нарушений в наземных экосистемах и ландшафтах в результате климатических и гидрологических изменений // Экосистемы: экология и динамика. 2017. Т. 1. № 3. С. 146–188.
11. Курбатова И. Е. Космический мониторинг негативных ситуаций в прибрежных зонах крупных водоемов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 52–59.
12. Кутузов А. В. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга систем «вода – суша» на равнинных водохранилищах (на примере Цимлянского водохранилища) // Исслед. Земли из космоса. 2011. № 6. С. 64–72.
13. Лобойко В. Ф., Овчарова А. Ю., Никитина Н. С. Особенности водного режима Нижней Волги и его влияние на состояние северо-западной части Волго-Ахтубинской поймы // Изв. Нижневолжского агроуниверситет. комплекса: наука и высшее образование. 2018. № 4(52). С. 89–96. DOI: 10.32786/2071-9485-2018-04-11.
14. Лупян Е. А., Прошин А. А., Бурцев М. А., Балашов И. В., Барталев С. А., Ефремов В. Ю., Кашицкий А. В., Мазуров А. А., Матвеев А. М., Суднева О. А., Сычуглов 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.
15. Миклашевич Т. С., Барталев С. А., Плотников Д. Е. Интерполяционный алгоритм восстановления длинных временных рядов данных спутниковых наблюдений растительного покрова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2019. Т. 16. № 6. С. 143–154. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-143-154.
16. Мухаметджанов И. Д., Константинова А. М., Лупян Е. А., Умирзаков Г. У. Оценка возможностей спутникового мониторинга динамики речного стока на примере анализа состояния реки Амударьи // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 87–103. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-87-103.
17. Рулев А. С., Шинкаренко С. С., Кошелева О. Ю. Оценка влияния гидрологического режима Волги на динамику затопления острова Сарпинский // Ученые записки Казанского ун-та. Сер. Естественные науки. 2017. Т. 159. Кн. 1. С. 139–152.
18. Рычагов Г. И. К методике геоморфологических исследований (геоморфологические уроки Каспия) // Геоморфология. 2019. № 4. С. 27–39. DOI: 10.31857/S0435-42812019427-39.
19. Шинкаренко С. С., Барталев С. А., Берденгалиева А. Н., Выприцкий А. А. (2021a) Динамика площадей водоёмов Западного ильменно-бугрового района дельты Волги // Современные

- проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 4. С. 285–290. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-285-290.
20. Шинкаренко С. С., Солодовников Д. А., Барталев С. А., Васильченко А. А., Выприцкий А. А. (2021б) Динамика площадей водохранилищ полуострова Крым // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2021. Т. 18. № 5. С. 226–241. DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-226-241.
21. Шинкаренко С. С., Барталев С. А., Берденгалиева А. Н., Иванов Н. М. Пространственно-временной анализ горимости пойменных ландшафтов Нижней Волги // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2022. Т. 19. № 1. С. 143–157. DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-143-157.
22. Adeli S., Salegi B., Mahdianpari M., Quackenbush L. J., Brisco B., Tamiminia H., Shaw S. Wetland Monitoring Using SAR Data: A Meta-Analysis and Comprehensive Review // Remote Sensing. 2020. V. 12. Art. No. 2190. DOI: 10.3390/rs12142190.
23. Bolgov M. V., Demin A. P. Water-Management and Environmental Problems of the Lower Volga and Ways to Their Solution // Water Resources. 2018. V. 45. No. 2. P. 297–305. DOI: 10.1134/S0097807818020033.
24. Bolgov M. V., Buber A. L., Komarovskii A. A., Lotov A. V. Searching for Compromise Solution in the Planning and Managing of Releases into the Lower Pool of the Volgograd Hydropower System. 1. Strategic Planning // Water Resources. 2018. V. 45. P. 819–826. DOI: 10.1134/S0097807818050044.
25. Bolgov M. V., Buber A. L., Komarovskii A. A., Lotov A. V. Search for Compromise Decisions in the Planning and Managing of Releases into the Lower Pool of the Volgograd Hydropower System. 2. Tactical Planning and Dispatching Control // Water Resources. 2019. V. 46. P. 480–491. DOI: 10.1134/S0097807819030047.
26. Golub V. B., Chuvashov A. V., Bondareva V. V., Gerasimova K. A., Nikolaichuk L. F. Changes in the flora composition of the Volga–Akhtuba floodplain after regulation of the flow of Volga River // Arid Ecosystems. 2020. V. 10. No. 1. P. 44–51. DOI: 10.1134/S2079096120010047.
27. Isaeva I. I., Voronin A. A., Khoperskov A. V., Kharitonov M. A. Modeling the Territorial Structure Dynamics of the Northern Part of the Volga-Akhtuba Floodplain // Computation. 2022. V. 10. Art. No. 62. DOI: 10.3390/computation10040062.
28. Kuzmina Zh. V., Treshkin S. E., Shinkarenko S. S. Effects of River Control and Climate Changes on the Dynamics of the Terrestrial Ecosystems of the Lower Volga Region // Arid Ecosystems. 2018. V. 8. No. 4. P. 231–244. DOI: 10.1134/S2079096118040066.
29. Kuzmina Zh. V., Shinkarenko S. S., Solodovnikov D. A. Main Tendencies in the Dynamics of Floodplain Ecosystems and Landscapes of the Lower Reaches of the Syr Darya River under Modern Changing Conditions // Arid Ecosystems. 2019. V. 9. No. 4. P. 226–236. DOI: 10.1134/S207909611904005X.
30. Kuzmina Zh. V., Shinkarenko S. S., Solodovnikov D. A., Markov M. L. The Effects of River Control and Climatic and Hydrological Changes on the State of Floodplain and Delta Ecosystems of the Lower Don // Arid Ecosystems. 2022. V. 12. No. 4. P. 361–373. DOI: 10.1134/S2079096122040126.
31. Loupian E. A., Bourtsev M. A., Proshin A. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Radchenko M. V., Tolpin V. A., Uvarov I. A. Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 1. Art. No. 77. 19 p. DOI: 10.3390/rs14010077.
32. Mahdianpari M., Granger J. E., Mohammadimanesh F., Salehi B., Brisco B., Homayouni S., Gill E., Huberty B., Lang M. Meta-Analysis of Wetland Classification Using Remote Sensing: A Systematic Review of a 40-Year Trend in North America // Remote Sensing. 2020. V. 12. No. 11. Art. No. 1882. DOI: 10.3390/rs12111882.
33. Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A. S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // Nature. 2016. V. 540. P. 418–422. DOI: 10.1038/nature20584.
34. Shumova N. A. Changes in environmentally significant characteristics of the hydrological regime of the Lower Volga under runoff control // Arid Ecosystems. 2014. V. 4. No. 3. P. 158–168. DOI: 10.1134/S207909611403010X.
35. Solodovnikov D. A., Shinkarenko S. S. Present-Day Hydrological and Hydrogeological Regularities in the Formation of River Floodplains in the Middle Don Basin // Water Resources. 2020. V. 47. No. 6. P. 719–728. DOI: 10.1134/S0097807820060135.
36. White L., Brisco B., Dabboor M., Schmitt A., Pratt A. A Collection of SAR Methodologies for Monitoring Wetlands // Remote Sensing. 2015. V. 7. No. 6. P. 7615–7645. DOI: 10.3390/rs70607615.
37. Zhang M., Li Z., Tian B., Zhou J., Tang P. The backscattering characteristics of wetland vegetation and water-level changes detection using multi-mode SAR: A case study // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. 2016. V. 45. P. 1–13. DOI: 10.1016/j.jag.2015.10.001.

The Lower Volga floodplain classification based on long-term hydrological and remote sensing data

S. S. Shinkarenko, S. A. Bartalev, M. A. Bogodukhov, I. I. Vorushilov, I. A. Saigin

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

E-mail: shinkarenko@d902.iki.rssi.ru

The changing climate and the regulation of river flow lead to significant changes in the hydrological regime of floodplain landscapes. This is manifested in the reduced amplitude of water levels, duration and frequency of floods, which causes a decrease in flooded areas. Periodic flooding of floodplain lands is the most important factor in the functioning of both terrestrial and aquatic ecosystems. The Volga-Akhtuba floodplain and the Volga delta are the only territories in the arid zone of Russia where overflows are observed almost every year during spring floods. The aim of the research is to map the floodplain lands of the Lower Volga based on information products for thematic processing of Earth remote sensing data by the Landsat satellite system and hydrological information (maximum water discharge and flood duration) for 1984–2021. The frequency of seasonal changes records in the water surface by satellite systems in the optical range depends on the number of cloudless observations and the frequency of surveys. The established relationships between hydrological characteristics and flood areas allowed us to correct the data with sufficient accuracy ($RMSE = 4.9\%$, $R^2 = 0.63$). Currently, only 30 % of the territory of the Volga-Akhtuba floodplain and the Volga delta can be flooded under the existing hydrological regime, while the high level of the floodplain has practically ceased to be flooded. The results obtained can be used in landscape-ecological studies, as well as for predicting flooding of floodplain areas under different hydrological conditions.

Keywords: Lower Volga, remote sensing, floodplain lands, flooding, mapping, hydrological regime

Accepted: 14.04.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-119-135

References

1. Baldina E. A., Troshko K. A., The creation of a map of the Volga delta agricultural lands current state and long-term changes, *Geodeziya i kartografiya*, 2016, No. 11, pp. 39–46 (in Russian), DOI: 10.22389/0016-7126-2016-917-11-39-46.
2. Bartalev S. A., Egorov V. A., Zharko V. O., Loupian E. A., Plotnikov D. E., Khvostikov S. A., Shabanov N. V., *Sputnikovoe kartografirovanie rastitel'nogo pokrova Rossii* (Land cover mapping over Russia using Earth observation data), Moscow: IKI RAN, 2016, 208 p. (in Russian).
3. Bolgov M. V., Shatalova K. Yu., Gorelits O. V., Zemlyanov I. V., Water and ecology problems of the Volga-Akhtuba floodplain, *Ekosistemy: ekologiya i dinamika*, 2017, Vol. 1, No. 3, pp. 15–37 (in Russian).
4. Buber A. A., Borodychev V. V., Talyzov A. A., Development of the hydrodynamic model of the delta of the river of the Volga and the Western steppe illments, *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee obrazovanie*, 2017, No. 2(46), pp. 271–284 (in Russian).
5. Vasilchenko A. A., Spatial Analysis of the Volga-Akhtuba Floodplain Irrigated Fields Infrastructure in the Volgograd Region, *Nauchno-agronomicheskii zhurnal*, 2022, No. 4(119), pp. 12–18 (in Russian), DOI: 10.34736/FNC.2022.119.4.002.12-18.
6. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Serykh I. V., Lebedev S. A., Climatic changes in hydrometeorological parameters of the Caspian Sea (1980–2020), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 5, pp. 277–291 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-277-291.
7. Zanozin V. V., Barmin A. N., Valov M. V., Remote sensing and GIS in modeling anthropogenic landscape transformation, *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*, 2020, No. 1, pp. 27–37 (in Russian), DOI: 10.25587/SVFU.2020.17.61131.
8. Kashnitskaya M. A., The dynamics of the water surface areas of steppe lakes in the Eastern Transbaikalia region using satellite data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 3, pp. 242–253 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-3-242-253.
9. Krivoshei V. A., *Reka Volga (problemy i resheniya)* (The Volga River: Problems and Solutions), Moscow: "Zhurnal "RT", 92 p. (in Russian).
10. Kuz'mina Zh. V., Treshkin S. E., Technique of an valuation of violations in land ecosystems and landscapes owing to climatic and hydrological changes, *Ekosistemy: ekologiya i dinamika*, 2017, Vol. 1, No. 3, pp. 146–188.

11. Kurbatova I. E., Space monitoring negative situations in coastal zones of large reservoirs, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 52–59 (in Russian).
12. Kutuzov A. V., Monitoring of the Large Flat Water Reservoirs Using Remote Sensing Data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2011, No. 6, pp. 64–72 (in Russian).
13. Loboiko V. F., Ovcharova A. Yu., Nikitina N. S., Features of the water regime of the Lower Volga and its impact on the condition of the north-western part of the Volga-Akhtuba floodplain, *Izvestiya Nizhnevolzhskogo agrouniversitetskogo kompleksa: nauka i vysshee obrazovanie*, 2018, No. 4(52), pp. 89–96 (in Russian), DOI: 10.32786/2071-9485-2018-04-11.
14. Loupian E. A., Proshin A. 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., IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284 (in Russian).
15. Miklashevich T. S., Bartalev S. A., Plotnikov D. E., Interpolation algorithm for the recovery of long satellite data time series of vegetation cover observation, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2019, Vol. 16, No. 6, pp. 143–154 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-6-143-154.
16. Mukhamedjanov I. D., Konstantinova A. M., Loupian E. A., Umirzakov G. U., Evaluation of satellite monitoring capabilities of stream runoff based on the Amu Darya River state analysis, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 1, pp. 87–103 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-87-103.
17. Rulev A. S., Shinkarenko S. S., Kosheleva O. Yu., Assessment of the influence of the hydrological regime of the Volga River on the dynamics of flooding on Sarpinsky island, *Uchenye zapiski Kazanskogo universiteta. Ser. Estestvennye nauki*, 2017, Vol. 159, No. 1, pp. 139–151 (in Russian).
18. Rychagov G. I., To the methods of geomorphological research (geomorphological lessons of the Caspian), *Geomorfologiya*, 2019, No. 4, pp. 27–39 (in Russian), DOI: 10.31857/S0435-42812019427-39.
19. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Berdengalieva A. N., Vypritskii A. A. (2021a), Dynamics of water bodies areas in the Western Ilmen Lake Region of the Volga Delta, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 4, pp. 285–290 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-4-285-290.
20. Shinkarenko S. S., Solodovnikov D. A., Bartalev S. A., Vasilchenko A. A., Vypritskii A. A. (2021b), Dynamics of the reservoirs areas of the Crimean Peninsula, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2021, Vol. 18, No. 5, pp. 226–241 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2021-18-5-226-241.
21. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Berdengalieva A. N., Ivanov N. M., Spatio-temporal analysis of burnt area in The Lower Volga floodplain, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2022, Vol. 19, No. 1, pp. 143–157 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2022-19-1-143-157.
22. Adeli S., Salegi B., Mahdianpari M., Quackenbush L. J., Brisco B., Tamiminia H., Shaw S., Wetland Monitoring Using SAR Data: A Meta-Analysis and Comprehensive Review, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Art. No. 2190, DOI: 10.3390/rs12142190.
23. Bolgov M. V., Demin A. P., Water-Management and Environmental Problems of the Lower Volga and Ways to Their Solution, *Water Resources*, 2018, Vol. 45, No. 2, pp. 297–305, DOI: 10.1134/S0097807818020033.
24. Bolgov M. V., Buber A. L., Komarovskii A. A., Lotov A. V., Searching for Compromise Solution in the Planning and Managing of Releases into the Lower Pool of the Volgograd Hydropower System. 1. Strategic Planning, *Water Resources*, 2018, Vol. 45, pp. 819–826, DOI: 10.1134/S0097807818050044.
25. Bolgov M. V., Buber A. L., Komarovskii A. A., Lotov A. V., Search for Compromise Decisions in the Planning and Managing of Releases into the Lower Pool of the Volgograd Hydropower System. 2. Tactical Planning and Dispatching Control, *Water Resources*, 2019, Vol. 46, pp. 480–491, DOI: 10.1134/S0097807819030047.
26. Golub V. B., Chuvashov A. V., Bondareva V. V., Gerasimova K. A., Nikolaichuk L. F., Changes in the flora composition of the Volga – Akhtuba floodplain after regulation of the flow of Volga River, *Arid Ecosystems*, 2020, Vol. 10, No. 1, pp. 44–51, DOI: 10.1134/S2079096120010047.
27. Isaeva I. I., Voronin A. A., Khoperskov A. V., Kharitonov M. A., Modeling the Territorial Structure Dynamics of the Northern Part of the Volga-Akhtuba Floodplain, *Computation*, 2022, Vol. 10, Art. No. 62, DOI: 10.3390/computation10040062.
28. Kuzmina Zh. V., Treshkin S. E., Shinkarenko S. S., Effects of River Control and Climate Changes on the Dynamics of the Terrestrial Ecosystems of the Lower Volga Region, *Arid Ecosystems*, 2018, Vol. 8, No. 4, pp. 231–244, DOI: 10.1134/S2079096118040066.
29. Kuzmina Zh. V., Shinkarenko S. S., Solodovnikov D. A., Main Tendencies in the Dynamics of Floodplain Ecosystems and Landscapes of the Lower Reaches of the Syr Darya River under Modern Changing Conditions, *Arid Ecosystems*, 2019, Vol. 9, No. 4, pp. 226–236, DOI: 10.1134/S207909611904005X.

30. Kuzmina Zh. V., Shinkarenko S. S., Solodovnikov D. A., Markov M. L., The Effects of River Control and Climatic and Hydrological Changes on the State of Floodplain and Delta Ecosystems of the Lower Don, *Arid Ecosystems*, 2022, Vol. 12, No. 4, pp. 361–373, DOI: 10.1134/S2079096122040126.
31. Loupian E. A., Bourtsev M. A., Proshin A. A., Kashnitskii A. V., Balashov I. V., Bartalev S. A., Konstantinova A. M., Kobets D. A., Radchenko M. V., Tolpin V. A., Uvarov I. A., Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, No. 1, Art. No. 77, 19 p., DOI: 10.3390/rs14010077.
32. Mahdianpari M., Granger J. E., Mohammadimanesh F., Salehi B., Brisco B., Homayouni S., Gill E., Huberty B., Lang M., Meta-Analysis of Wetland Classification Using Remote Sensing: A Systematic Review of a 40-Year Trend in North America, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, No. 11, Art. No. 1882, DOI: 10.3390/rs12111882.
33. Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A. S., High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes, *Nature*, 2016, Vol. 540, pp. 418–422, DOI: 10.1038/nature20584.
34. Shumova N. A., Changes in environmentally significant characteristics of the hydrological regime of the Lower Volga under runoff control, *Arid Ecosystems*, 2014, Vol. 4, No. 3, pp. 158–168, DOI: 10.1134/S207909611403010X.
35. Solodovnikov D. A., Shinkarenko S. S., Present-Day Hydrological and Hydrogeological Regularities in the Formation of River Floodplains in the Middle Don Basin, *Water Resources*, 2020, Vol. 47, No. 6, pp. 719–728, DOI: 10.1134/S0097807820060135.
36. White L., Brisco B., Dabboor M., Schmitt A., Pratt A., A Collection of SAR Methodologies for Monitoring Wetlands, *Remote Sensing*, 2015, Vol. 7, No. 6, pp. 7615–7645, DOI: 10.3390/rs70607615.
37. Zhang M., Li Z., Tian B., Zhou J., Tang P., The backscattering characteristics of wetland vegetation and water-level changes detection using multi-mode SAR: A case study, *Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2016, Vol. 45, pp. 1–13, DOI: 10.1016/j.jag.2015.10.001.