

Спутниковый мониторинг прохождения половодья в бассейне реки Урал в 2024 г.

С. С. Шинкаренко, С. А. Барталев, Е. А. Лупян

Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

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

Весной 2024 г. половодье на р. Урал характеризовалось исключительно высоким уровнем, что привело к частичному затоплению нескольких городов — Орска, Оренбурга в России и Уральска в Казахстане. Предпосылками для высокого половодья стали значительный снеговой запас, большая глубина промерзания почв, их повышенная влажность, а также резкое потепление в конце марта после достаточно низкой температуры воздуха февраля и первой половины марта. Спутниковые данные среднего пространственного разрешения MODIS позволили отследить прохождение волны половодья на р. Урал от верхнего течения до устья, а также на её самых крупных притоках — р. Большой Кумак, Орь, Сакмара, Илек, Утва, Кинделя, Иртек и Чаган. В настоящей статье приведены результаты определения ежедневной площади и длительности затопления пойм Урала и его притоков. Полученные по данным MODIS оценки площади и времени добегающей волны половодья достаточно точно согласуются с данными гидрологических постов об уровне воды. Половодье в верхнем и среднем течении р. Урал развивалось достаточно стремительно, в первую очередь выход воды на пойму зафиксирован на впадающих с юга левых притоках Урала, где в силу широтно-зональных особенностей таяние снега началось раньше, чем в бассейнах впадающих с севера правых притоков. Из-за нетипично большого количества выпавших осадков летом 2024 г. повышенный уровень на р. Урал отмечался вплоть до сентября, но затопление поймы в этот период зафиксировано только в нижнем течении реки. Используемые подходы по картографированию первой и последней даты фиксации водного зеркала на пойме и последующего определения продолжительности половодья и времени добегающей волны половодья могут быть рекомендованы для применения в специализированных системах гидрологического мониторинга по данным дистанционного зондирования.

Ключевые слова: дистанционное зондирование, пойма, половодье, р. Урал, затопление, мониторинг

Одобрена к печати: 06.02.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-268-282

Введение

Весна 2024 г. характеризовалась исключительно высоким уровнем половодья на р. Урал (*казах.* Жайык) и её притоках, а также некоторых других реках юга Западной Сибири, Западного и Северного Казахстана (Терехов и др., 2024; Турсунова и др., 2024). В результате несколько крупных населённых пунктов оказались частично затопленными, в том числе Орск, Оренбург в России и Уральск в Казахстане (Чепашев и др., 2024; Шинкаренко и др., 2024). Предпосылками высокого уровня воды при половодье в 2024 г. были повышенный запас снега, высокая влажность верхних горизонтов почвы, большая глубина промерзания почв, низкая температура февраля — марта 2024 г. и резкий рост температуры воздуха в период с конца марта до начала апреля, что привело к формированию значительного поверхностного стока талых вод (Терехов и др., 2024).

В период после основания Оренбурга (1743) в окрестностях города отмечалось более 20 крупных наводнений (например, 1749, 1854, 1922, 1942, 1957, 1993, 1994, 2000 и 2005 гг. (Сивохиц, Падалко, 2014; Чибилёв, 2008)), поэтому экстремально высокое половодье 2024 г. не является аномальным событием. Тем не менее его максимальный уровень (1185 см) в Оренбурге стал наивысшим с 1994 г. и превысил максимальную отметку 2005 г. (896 см) практически на три метра (*рис. 1*, см. с. 269), что делает весенний паводок 2024 г. исключительным событием.

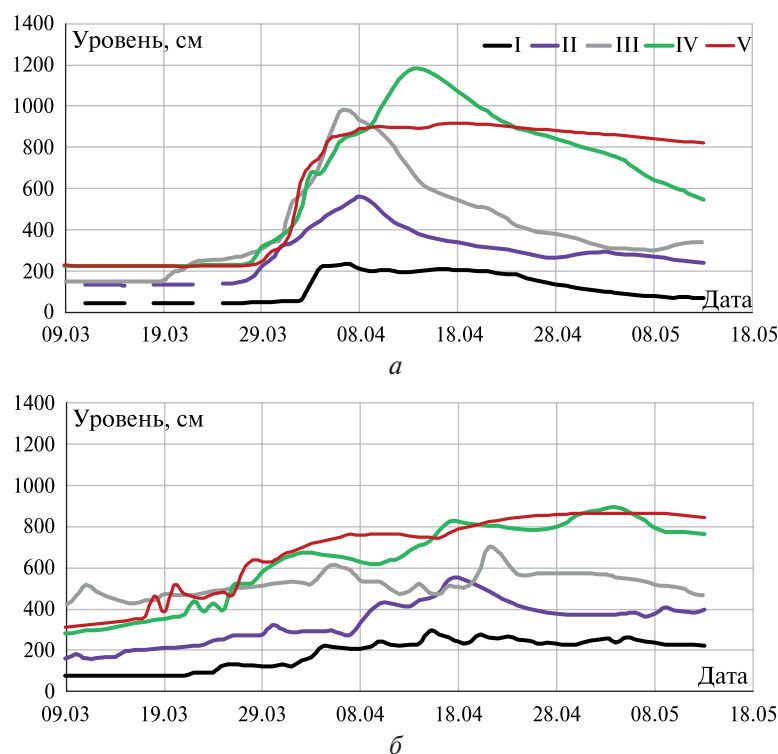


Рис. 1. Динамика максимальных суточных уровней в 2024 г. (а) и максимальных уровней за 2001–2023 гг. (б) по гидропостам на р. Урал в российской части бассейна: I — Верхнеуральск, II — Кизильское, III — Орск, IV — Оренбург, V — Илек

Последние десятилетия в бассейне р. Урал отмечаются снижением стока половодья и увеличением меженного стока, особенно в зимний период из-за частых оттепелей. Процесс стока талых вод на реках бассейна р. Урал характеризуется неоднородностью, также на разных реках имеются существенные отличия в доле стока, который приходится на период половодья (Сивохип, Павлейчик, 2024). Мониторинг продвижения волны половодья на разных участках рек и их притоков позволяет прогнозировать сроки выхода воды на пойму ниже по течению, высоту подъёма воды, а также оценивать риски затопления объектов инфраструктуры. Поэтому представляет интерес анализ прохождения волны половодья в 2024 г. не только по р. Урал, но и по её крупнейшим притокам (Большой Кумак, Орь, Сакмара, Илек, Утва, Кинделя, Иртек, Чаган). Для мониторинга паводков и последствий экстремальных гидрологических событий достаточно широко используются данные дистанционного зондирования Земли из космоса (Воронова и др., 2020; Дубина и др., 2018; Константинова, Лупян, 2020; Терехов и др., 2020; Шинкаренко, Барталев, 2023; Шинкаренко, Васильченко, 2023).

Цель исследования заключается в определении площади водного зеркала и сроков затопления территорий в пойме р. Урал и её основных притоков в период половодья 2024 г. по спутниковым данным.

Материалы и методы исследования

Картографирование водного зеркала основано на спутниковых изображениях MODIS (англ. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) пространственного разрешения около 250 м по данным глобального информационного продукта MCDWD (англ. MODIS Near Real-Time Global Flood Product) (Slayback et al., 2023) за период 20 марта (начало повышения уровня, см. рис. 1, 2 (см. с. 270)) – 20 сентября 2024 г. Указанный информационный продукт предоставляется в оперативном режиме и доступен с 15 ноября 2022 г. В его основе лежат коэффициенты

спектральной яркости в красном и ближнем инфракрасном диапазонах MOD09.NRT.061, а отнесение пикселей к водной поверхности осуществляется на основе сравнения с пороговыми значениями.

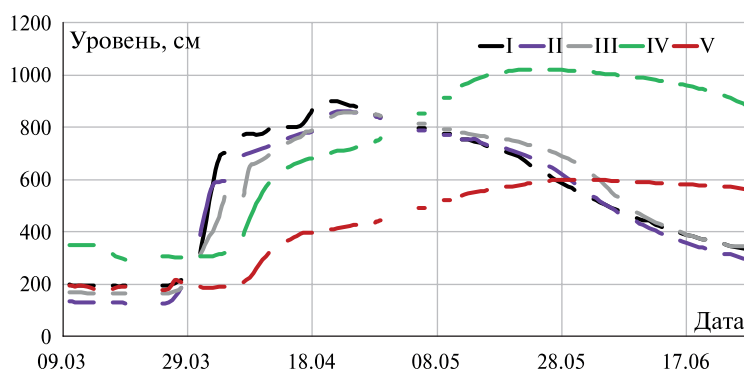


Рис. 2. Динамика средних суточных уровней в 2024 г. по гидропостам на р. Урал в казахстанской части бассейна: I — Январцево, II — Уральск, III — Кушум, IV — Махамбет, V — Атырау

Данные об уровнях воды по гидрологическим постам российской части бассейна Урала приведены согласно сервису «Уровень воды онлайн» (allrivers.info), для казахстанской части бассейна гидрологические данные на весну 2024 г. даются в соответствии с ежедневными гидрологическими бюллетенями Национальной гидрометеорологической службы РГП «Казгидромет» (kazhydromet.kz/ru/gidrologiya/konsultativnyy-prognoz-pogody-na-sezon/2024). Расположение гидропостов показано на рис. 3 (см. с. 271).

Границы речных пойм выделялись экспертным дешифрированием спутниковых изображений высокого пространственного разрешения с учётом цифровых моделей рельефа и максимальных площадей водного зеркала по данным информационных продуктов MCDWD и GSW (англ. Global Surface Water) (Pekel et al., 2016). Речные поймы в степной и пустынной зоне не только выделяются в рельефе, но и обладают чёткими дешифровочными признаками, особенно во второй половине лета и начале осени, когда окружающая их зональная растительность на надпойменных террасах и за пределами речных долин не вегетирует, а в поймах развитая лесная и луговая растительность продолжает вегетацию (Солодовников и др., 2022). Границы долины рек степной и пустынной зоны в рельефе в современных условиях достаточно стабильны (Solodovnikov, Shinkarenko, 2020), поэтому их частое обновление не требуется. Кроме непосредственно уральской поймы были картографированы границы пойм крупнейших притоков Урала: Большой Кумак, Орь с Ойсылкарой, Сакмара с низовьями Салмыша и Большого Ика, Илек с Кобдой, Утва, Кинделя, Иртек с низовьями Ташелки, Чаган. Пойма Урала разделена на три части: в верхнем (выше Орска), среднем (от Орска до Уральска) и нижнем (ниже Уральска) течении реки.

Большую часть долины Урала можно отнести к типичным равнинным рекам с широкой долиной, в которой река свободно меандрирует, образуя большое количество затонов и стариц. При этом на нижнее и среднее течение приходится более 90 % площади уральской поймы. Ширина поймы Урала в среднем и нижнем течении достигает 15–20 км, её склоны практически не изрезаны из-за подмыва рекой высоких надпойменных террас (Чибилёв, 2008), поэтому применение спутниковых данных среднего пространственного разрешения для определения водного зеркала на такой значительной площади оправдано.

Использованный информационный продукт MCDWD детектирует увеличение площади водного зеркала, зафиксированное в течение 1–3 дней подряд, что позволяет снизить долю возможных ложных определений из-за теней от облаков. В каждом пикселе устанавливалась первая и последняя дата фиксации водного зеркала (рис. 4б, в (см. с. 272), 5 (см. с. 273)), после чего рассчитывалась площадь затопления поймы на каждую дату года (см. рис. 4г). К водной поверхности на конкретную дату относились пиксели, в которых первая фиксация

затопления была раньше, а последняя — позже этой даты. Таким образом могут быть построены ежедневные карты затоплений, а также определена площадь водной поверхности на пойме на произвольную дату. При подобном подходе не исключена неопределённость из-за нескольких пиков половодья, когда вода может стекать с поймы, а затем снова её затоплять. Тем не менее в 2024 г. половодье характеризовалось одним пиком (см. рис. 1, 2), поэтому и подъём, и спад воды происходили равномерно. Данный подход позволяет снизить влияние облачности в период пика половодья, из-за которого площадь затопления по спутниковым изображениям на отдельные даты занижается. В то же время существенным ограничением представляется и наличие безоблачных спутниковых изображений особенно в периоды начала и окончания половодья. В 2024 г. на весь период половодья в бассейне Урала доступно достаточное количество спутниковых данных для анализа особенностей его прохождения. Обработка спутниковых изображений выполнялась с использованием системы "Vegetation Science" (Loupran et al., 2022) и инфраструктуры центра коллективного пользования "ИКИ-Мониторинг" (Лупян и др., 2015).

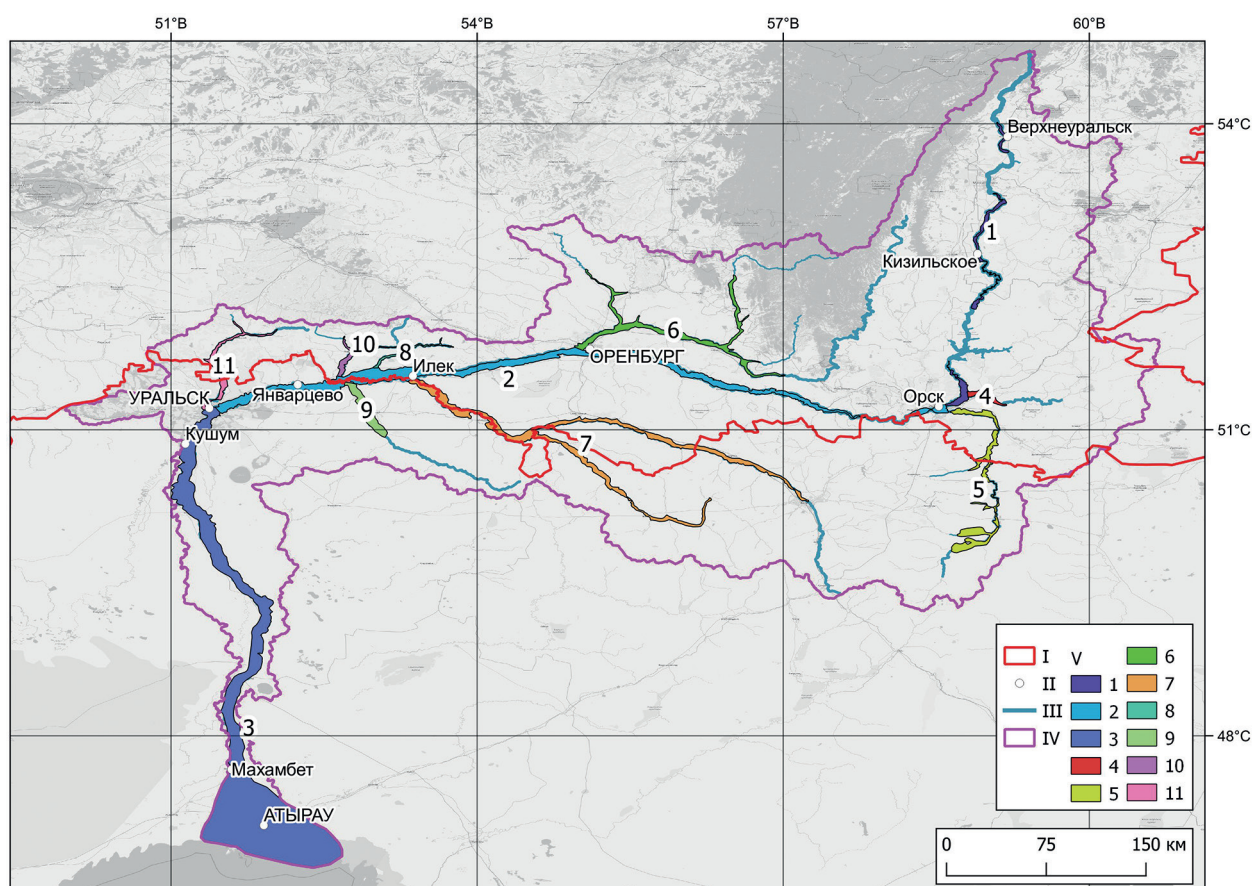


Рис. 3. Территория исследований: I — государственная граница РФ, II — гидрологические посты, III — гидрографическая сеть, IV — бассейн р. Урал, V — поймы Урала и его притоков (1 — Урал в верхнем течении, 2 — Урал в среднем течении, 3 — Урал в нижнем течении, 4 — Большой Кумак, 5 — Орь, 6 — Сакмара, 7 — Илек, 8 — Кинделя, 9 — Утва, 10 — Иртек, 11 — Чаган)

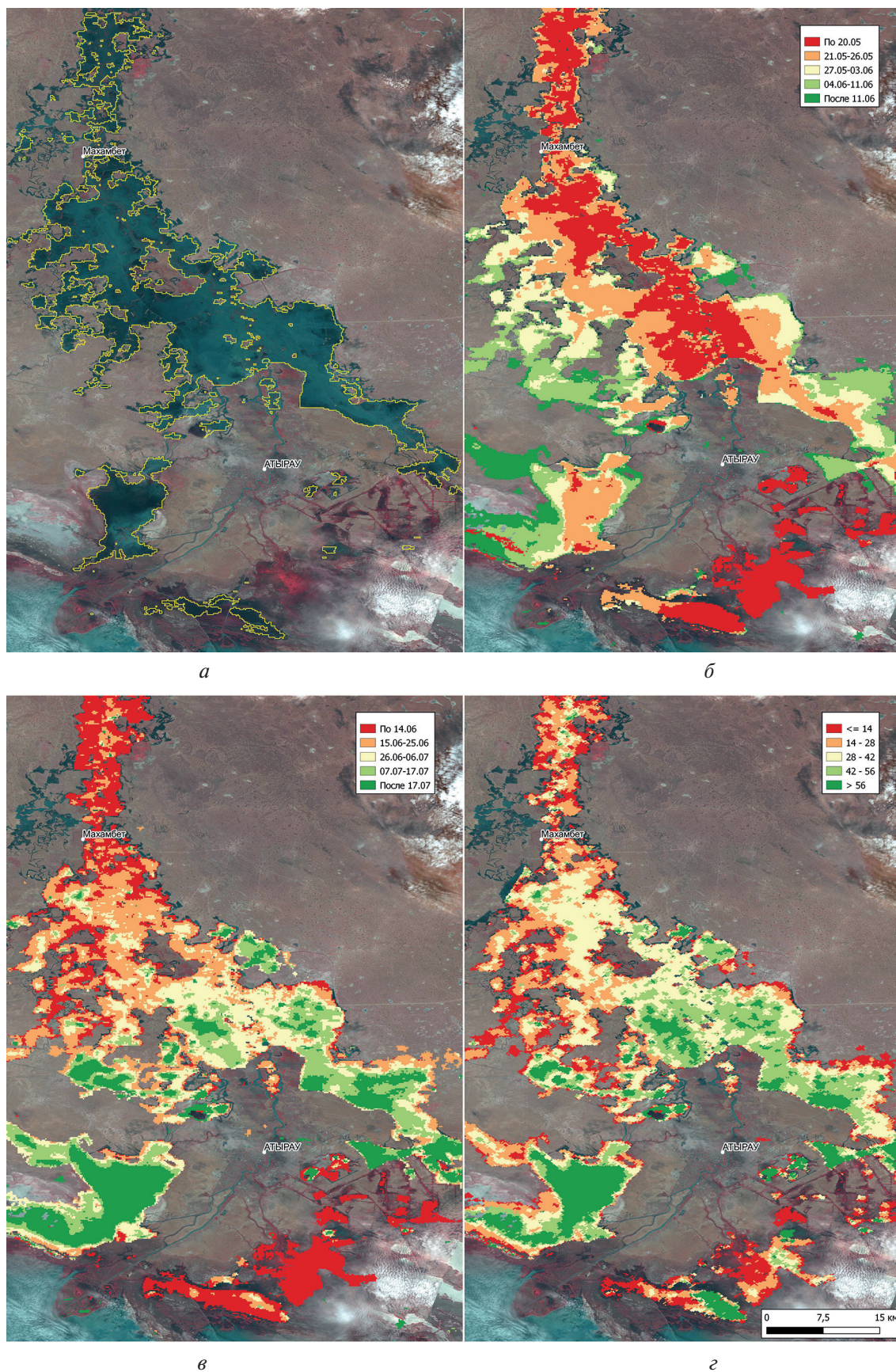
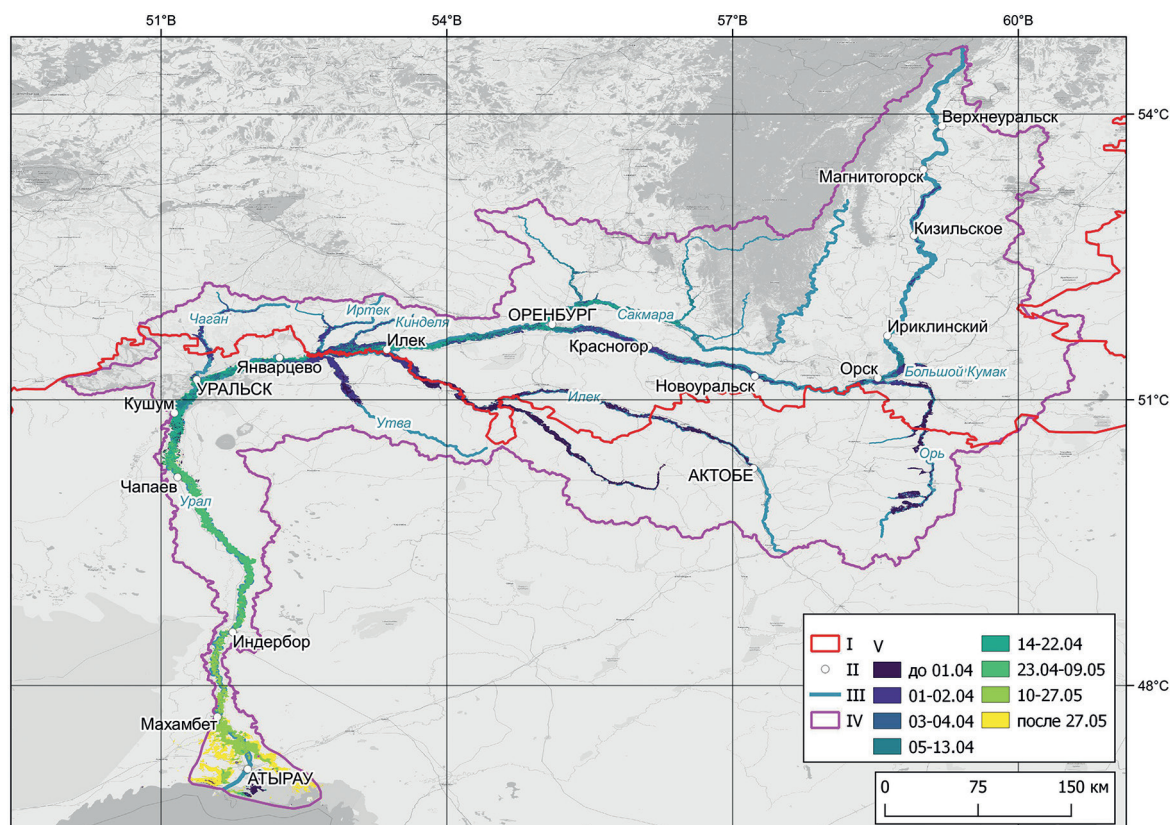
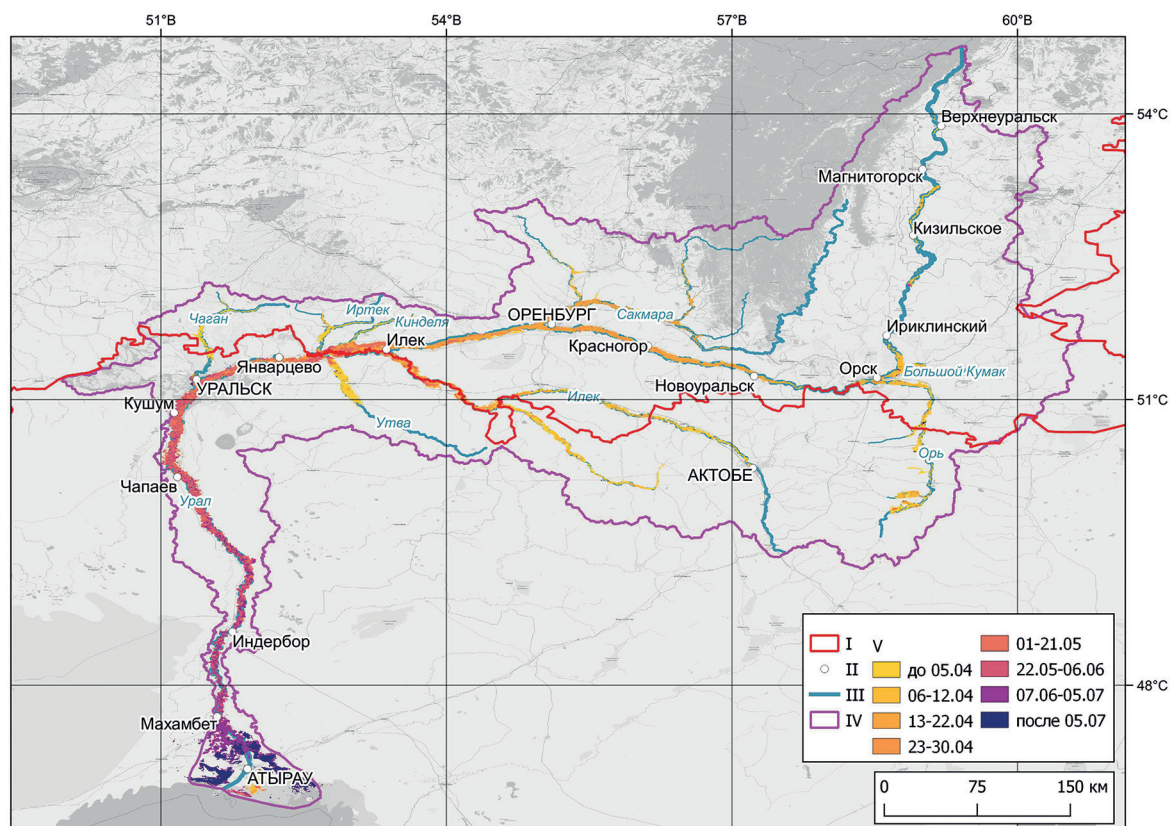


Рис. 4. Пример определения площади затопления в окрестностях г. Атырау по данным MCDWD: а — спутниковое изображение Landsat на 31.05.2024, синтез NIR-Red-Green (англ. near infrared), жёлтый контур — положение водного зеркала; б — даты первой фиксации водного зеркала; в — даты последней фиксации водного зеркала; г — количество дней стояния воды на пойме



а



б

Рис. 5. Продвижение волны половодья в бассейне р. Урал в 2024 г.: I — государственная граница, II — населённые пункты, III — реки, IV — водосборный бассейн р. Урал, V — даты первого (а) и последнего (б) наблюдений водного зеркала в 2024 г.

Результаты и обсуждение

Подъём уровня воды в р. Урал (по данным сервиса allrivers.info, доступным только по 18 мая 2024 г.) в первую очередь был зафиксирован гидрологическим постом в г. Орске 20 марта (см. *рис. 1*), когда большая часть водосборного бассейна была ещё покрыта снегом. В Оренбурге подъём воды отмечен 28 марта, а на гидрологическом посту в пос. Илек — 30 марта. Выше по течению Ириклинского вдхр. по гидрологическому посту в с. Кизильское подъём воды также зафиксирован 30 марта, а в Вехнеуральске — 3 апреля. В нижнем течении р. Урал подъём уровня начался после 5 апреля по данным гидрологического поста в пос. Махамбет. Максимальные уровни были достигнуты практически одновременно на гидрологических постах в г. Верхнеуральске и Орске (7 апреля) и с. Кизильское (8 апреля). В Оренбурге максимальный уровень воды зафиксирован 14 апреля, а в пос. Илек — 17 апреля. В нижнем течении р. Урал максимальные уровни отмечены 23 апреля в г. Уральске и пос. Кушум, а в пос. Махамбет и г. Атырау — 22 и 27 мая соответственно (см. *рис. 2*).

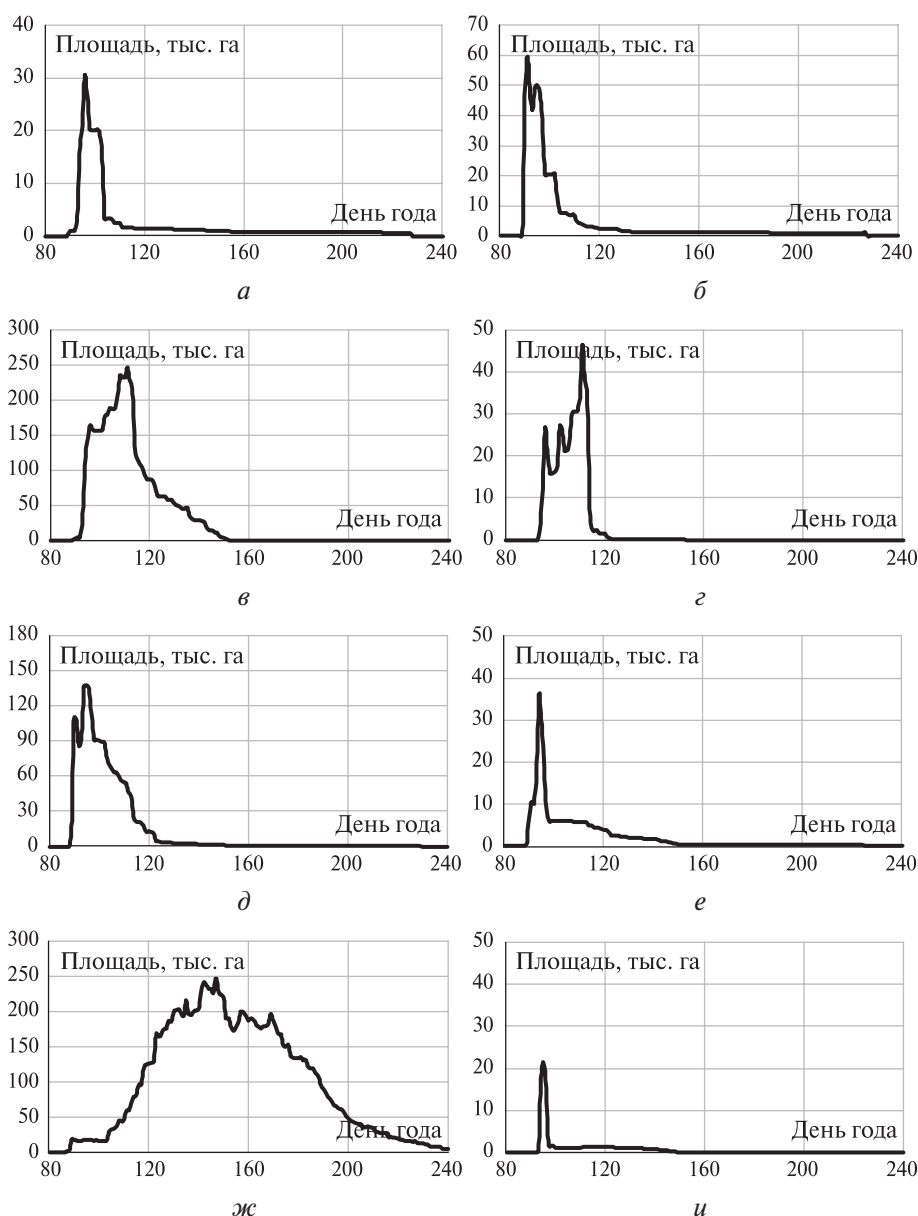


Рис. 6. Динамика площади водного зеркала в пойме р. Урал и её притоков в 2024 г.: *а* — р. Урал в верхнем течении; *б* — р. Орь; *в* — р. Урал в среднем течении; *г* — р. Сакмара; *д* — р. Илек; *е* — р. Утва; *ж* — р. Урал в нижнем течении; *и* — р. Чаган

Обращает внимание достаточно длительное поддержание близких к максимальным значениям уровня воды в р. Урал по гидрологическому посту в пос. Илек. Водная поверхность в пойме в среднем течении р. Урал по спутниковым данным отмечалась вплоть до начала июня (рис. 6в, см. с. 274). Это может быть связано с относительно малым уклоном р. Урал в её среднем течении, что способствует образованию большого количества протоков, отмелей, островов и увеличению шероховатости. Также отмечается негативное влияние на гидрологический режим половодья строительства в последние десятилетия ряда мостовых переходов, не обеспечивающих необходимую пропускную способность (Сивохиц, Падалко, 2014). Эта особенность территории в совокупности с высокой водностью половодья 2024 г. на р. Урал привели к катастрофическим затоплениям в Оренбурге (Шинкаренко и др., 2024). Также очень продолжительное время была затоплена дельтовая часть р. Урал, где близкие к максимальным величинам уровни воды держались практически до начала июля, а повышенный уровень наблюдался и в сентябре. Затопление поймы по спутниковым данным здесь фиксировалось вплоть до конца августа (см. рис. 6ж).

Во многом длительный период высокого уровня воды вызван повышенным количеством выпавших осадков в среднем и верхнем течении р. Урал, из-за чего на протяжении практически всего лета наблюдалось увеличение речного стока. По данным сервиса «Погода и климат» (pogodaiklimat.ru) по метеостанциям в Магнитогорске и Оренбурге в 2024 г. отмечено рекордное количество осадков как минимум за последние 20–30 лет, из которых половина выпала в летние месяцы. В Оренбургской обл. в 2024 г. наблюдалось значимое положительное отклонение максимальных значений NDVI (англ. Normalized Difference Vegetation Index) озимых культур от среднего в 2019–2023 гг. на 5–25 %, в то время как на большей части юга европейской части урожайность озимых была на уровне нормы или ниже. Также Оренбургская обл. и юг Приуралья характеризовались и наибольшей величиной отклонения NDVI посевов яровых от пятилетней нормы в большинстве районов более чем на 15–25 % (Трошко и др., 2024). Таким образом, климатические факторы, обусловившие предпосылки для экстремально высокого половодья, создали благоприятные условия для развития озимых культур за счёт повышенного увлажнения почвы. Аномальное количество осадков, выпавшее в летний период, благоприятно отразилось на состоянии озимых культур и в ещё большей степени на состоянии яровых.

По данным А.А. Турсуновой и соавторов (2024) в XX в. волна половодья проходила расстояние от Оренбурга до Атырау за 20 суток в 1942 г., а в 1994 г. уже за 28 дней. В 2024 г. волна половодья преодолела это расстояние за 43 дня (см. рис. 1а, 2). Отчасти увеличение сроков прохождения волны половодья связано со строительством Ириклинского вдхр. и общим снижением водности р. Урал (Турсунова и др., 2024).

Традиционно время добегания волны половодья вычисляют по датам наблюдений максимальных уровней на гидрологических постах, либо с использованием гидродинамических моделей, которые основываются на гидрологической, метеорологической и топографической информации. При этом использование гидрологической информации для прогнозирования времени прохождения пика половодья, сопровождающегося выходом воды на пойму, вниз по течению реки затруднено. Это связано со значительно меньшей глубиной потока и большей шероховатостью ложа поймы (Борщ и др., 2024). Возможность получения ежедневных спутниковых данных позволяет определять время добегания волны половодья между произвольными створами реки без использования гидродинамических моделей (Зилитинкевич, 2024).

В верхнем течении Урала (выше Орска) выход воды на пойму по данным MODIS отмечен 2 апреля, в среднем течении (от Орска до Уральска) — 30 марта, а в нижнем течении (ниже Уральска) — 29 марта. При этом в верхнем течении Урала разлив реки продолжался до 6 мая, в среднем течении — до 26 мая, а в нижнем — до конца августа (см. рис. 6). На правых притоках, стекающих с северной части бассейна (Сакмара, Кинделя, Иртека, Чаган), половодье началось 3 апреля. На левых притоках Урала (Большой Кумак, Орь, Илек и Утва) подъём уровней воды, сопровождающийся выходом воды на пойму, начался раньше на несколько дней — в период 29–30 марта. Это было вызвано стремительным таянием снега на достаточно

влажной и мёрзлой почве в бассейне Урала, что обеспечило резкое увеличение поверхностного стока и подъём уровня воды в р. Урал.

А. Г. Терехов с соавторами (2024) на основе анализа двадцатилетних рядов данных информационных продуктов USGS (*англ.* United States Geological Survey) FEWS NET (*англ.* Famine Early Warning Systems Network) об аномалиях декабрьской влажности почвенного слоя 0–100 см и аномалий водного эквивалента снежного покрова на 15 февраля в сочетании с данными реанализа установили, что определяющими факторами повышенного стока талых вод выступили высокая влажность почвы на фоне низкой температуры зимы, которая обусловила значительную глубину промерзания почв. По данным прогноза ФГБУ «Гидрометцентр России» (meteoinfo.ru/images/news/2024/03/15/2024-polovodie.pdf) температура в первой половине марта в бассейне Урала была на 2–5 °С ниже нормы, глубина промерзания почвы в среднем составила 50 см, местами превышая 100 см, осеннее увлажнение почвы было выше нормы на 198–370 %, запасы воды в снеге в Приуралье превышали норму в 1,1–1,7 раза, а ожидаемые уровни половодья на р. Урал предполагались превышающими на величину до 2 м среднесуточные значения с возможным затоплением пониженных участков в г. Орске, Оренбурге и с. Илек.

Разница в датах выхода воды на пойму в окрестностях Оренбурга и Атырау в 2024 г. составила 39 дней. Даты максимальных площадей затопления, выявленных по спутниковым данным, достаточно точно соответствуют датам наблюдений наивысших уровней на гидрологических постах. Максимальная площадь затопления в верхнем течении Урала зафиксирована 4 апреля, в среднем течении — 20 апреля, а в нижнем — 26 мая. На притоках Урала максимальная площадь затопления наблюдалась 31 марта на р. Орь, 3 апреля на р. Утве, 4 апреля на р. Илек, Кинделя, Иртек и Чаган, 5 апреля на р. Большой Кумак и 20 апреля — на р. Сакмара.

На большей части пойм р. Чаган, Утва, Иртек и Кинделя продолжительность затопления поймы не превысила одну неделю. В пойме Урала в его верхнем течении, а также в поймах р. Орь, Илек, Большой Кумак и Сакмара затопление по спутниковым данным отмечалось в течение 1–3 недель. В среднем течении Урала большая часть залитой поймы была затоплена три и более недели, а в нижнем течении — более месяца.

Полученные площади затоплений по данным MODIS в период половодья 2024 г. достаточно тесно коррелируют с данными об уровнях воды на гидрологических постах (*рис. 7*, см. с. 277), при этом выделяются фазы подъёма и спада воды, которым соответствуют разные площади при равных уровнях. Учёт фазы половодья позволяет получить более точные взаимосвязи площадей затопления и уровней воды, так как после прохождения пика половодья тем же уровням, что и в начале половодья, соответствуют большие площади затоплений (Зилитинкевич, 2024; Турсунова и др., 2024). Для более детального анализа особенностей прохождения половодья в окрестностях гидрологических постов были выделены участки на 30 км выше и ниже по течению. Обращает внимание достаточно стремительный выход воды на пойму в верхнем течении Урала в окрестностях с. Кизильское и в нижнем течении — в окрестностях пос. Махамбет в вершине дельты, в то время как в среднем течении реки в районе Оренбурга подъём уровня воды продолжительное время не сопровождается ростом площади затопления (см. *рис. 7б*). Ниже по течению с. Кизильское долина Урала имеет небольшую ширину и очень слабо развитую пойму, поскольку прорезает твёрдые горные породы. В результате на фазе подъёма уровней воды выше с. Кизильского площади затопления стремительно растут, снижаются быстро на фазе спада, в то время как площади затопления ниже по течению почти не уменьшаются при тех же уровнях, когда река проходит участок с крутыми и высокими бортами долины. В среднем течении реки в окрестностях Оренбурга на фазе подъёма воды длительное время не происходит быстрого роста площади затопления. Это связано с развитой поймой с большим количеством протоков, озёр и грив, из-за чего требуется относительно длительный период наполнения пойменных ёмкостей (Чибилев, 2008). Также в пользу значительной роли длительного дотекания воды в пойме Урала в его среднем течении свидетельствует и продолжение увеличения площадей затопления в начальной фазе понижения уровня воды в русле. В окрестностях пос. Махамбет в нижнем течении р. Урал в вершине её дельты отмечается значительное увеличение площади зато-

пления при относительно небольших изменениях уровня воды. Это объясняется большой шириной поймы и меньшими превышениями её высоты над меженным уровнем воды. Таким образом, ежедневные спутниковые данные среднего пространственного разрешения могут успешно применяться для разработки карт затоплений при разных уровнях воды в реке, а также мониторинга и исследований особенностей прохождения волны половодья.

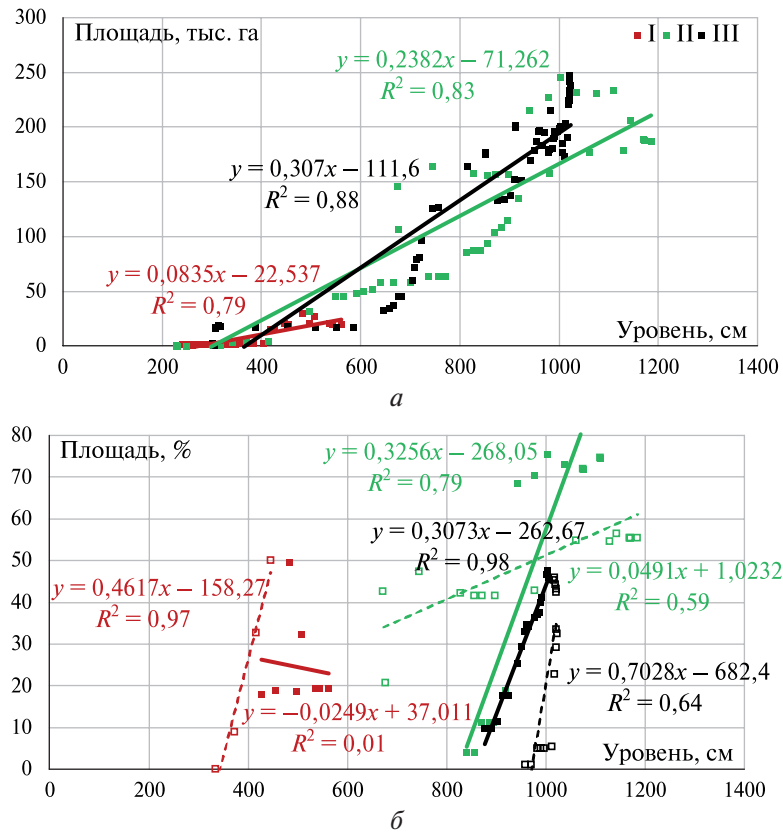


Рис. 7. Взаимосвязь площади затопления поймы и уровня воды по данным гидрологических постов при половодье на р. Урал в 2024 г. во всём бассейне (а) и в 30-километровых окрестностях гидрологических постов (б): I — верхнее течение, с. Кизильское; II — среднее течение, Оренбург; III — нижнее течение, пос. Махамбет. Штриховые линии и белые маркеры — фазы подъёма воды, сплошные линии и маркеры — фазы спада воды

По данным информационного продукта детектирования водной поверхности OPERA_L3_DSXW-HLS_V1 (англ. OPERA Dynamic Surface Water Extent from Harmonized Landsat Sentinel-2 product) пространственного разрешения 30 м, который основан на данных спутников Sentinel-2A/2B и Landsat-8/-9 (англ. Harmonized Landsat Sentinel-2 — HLS (Claverie et al., 2018; Jones, 2019)), максимальная площадь одномоментно зафиксированного водного зеркала в 2024 г. составила около 680 тыс. га, в том числе примерно 190 тыс. га постоянных водоёмов, которые не учитываются как сезонное затопление данными MCDWD, по которым максимальная одномоментная площадь затопления составила 480 тыс. га. При этом наиболее близки оценки затопления в 2024 г. по данным MODIS с максимальной площадью водной поверхности по данным более высокого разрешения для нижнего, среднего течения Урала и наиболее крупных притоков (Сакмара, Илек), в то время как в верхнем течении и в поймах небольших притоков выявленные площади затопления значительно отличаются. Это может быть связано с тем, что половодье в нижнем течении Урала начинается позже, в среднем оно более продолжительное, что снижает влияние облачности на спутниковые наблюдения. В то же время пойма Урала в нижнем и среднем течении имеет наибольшую ширину, а её склоны практически не изрезаны из-за подмыва надпойменных террас рекой. По этим причинам

здесь нивелируются отличия при определении площади водного зеркала в период максимальных уровней воды в реке, связанные с разным пространственным разрешением данных MODIS и HLS. На относительно небольших притоках Урала (Чаган, Орь, Иртек, Утва, Кинделя) максимальная площадь водного зеркала по данным MODIS больше в 2–3 раза по сравнению с результатами, полученными по спутниковым изображениям высокого пространственного разрешения. Это может быть связано как со стремительным прохождением половодья в период повышенной облачности, из-за чего затопление пойм на пике половодья не зафиксировано спутниками Landsat и Sentinel-2 с более низким временным разрешением, так и с отнесением к водной поверхности только частично занятых водой пикселей MODIS, по причине чего площадь затопления может получиться значительно большей. В то же время более низкое разрешение данных MODIS может препятствовать обнаружению относительно небольших затоплений, а также приводить к недооценке площади водного зеркала на ранних стадиях половодья. В целом по бассейну Урала оценки максимальной площади затопления по данным MODIS разрешения около 250 м и результатам картографирования по спутниковым изображениям высокого разрешения достаточно близки.

В верхнем и среднем течении Урала половодье приходится в основном на апрель и первую половину мая, когда отмечается повышенная облачность, затрудняющая картографирование водного зеркала по оптическим спутниковым данным, особенно высокого пространственного разрешения, так как частота их получения ниже. Также критически важно для картографирования затоплений фиксировать пик половодья, для чего необходимо высокое временное разрешение, поскольку нередко за период между безоблачными сеансами спутниковой съёмки волна половодья проходит, из-за чего максимальная площадь затоплений не фиксируется (Шинкаренко и др., 2023). Поэтому в верхнем и среднем течении р. Урала, а также в поймах её притоков по данным MODIS получены более высокие оценки площади по сравнению с данными Landsat и Sentinel-2.

Заключение

Комплексный анализ данных дистанционного зондирования Земли из космоса, метеорологической и гидрологической информации позволил установить предпосылки и ход экстремального половодья на р. Урал в 2024 г. Данные среднего разрешения спутниковой системы MODIS имеют высокую частоту наблюдений и достаточную для картографирования площади затопления в бассейне Урала пространственную детальность. Сопоставление полученных результатов с данными картографирования водного зеркала более высокого пространственного разрешения показало достаточно близкие оценки площади затопления в 2024 г.

Построенные в настоящей работе карты дат первой и последней фиксации водной поверхности в пикселях MODIS предоставили возможность получить ежедневные карты затопления пойм р. Урал и её крупнейших притоков с минимизацией влияния облачного покрова. Также на основе первых и последних дат наблюдений водного зеркала определена длительность стояния воды на поймах Урала и его притоков. На большей части пойм р. Чаган, Утва, Иртек и Кинделя продолжительность затопления поймы не превысила одну неделю. В пойме Урала в его верхнем течении, а также в поймах р. Орь, Илек, Большой Кумак и Сакмара затопление по спутниковым данным отмечалось в течение 1–3 недель. В среднем течении Урала большая часть залитой поймы была затоплена три и более недели, а в нижнем течении — более месяца. Данные о длительностях стояния воды на пойме крайне важны как для исследований состояния растительности речных пойм, так и для территориального планирования хозяйственного использования земель. Полученные оценки площади и времени добегания волны половодья достаточно точно согласуются с данными гидрологических постов об уровне воды.

Половодье в верхнем и среднем течении р. Урал развивалось достаточно стремительно, в первую очередь выход воды на пойму зафиксирован на впадающих с юга левых притоках Урала, где в силу широтно-зональных особенностей таяние снега началось раньше, чем в бассейнах впадающих с севера правых притоков. Из-за нетипично большого количества выпав-

ших осадков летом 2024 г. повышенные уровни на р. Урал отмечались вплоть до сентября, но затопление поймы в этот период зафиксировано только в нижнем течении реки.

Предложенный подход для построения ежедневных карт затопления и определения площади водного зеркала при половодье может быть рекомендован и для других равнинных рек, у которых большая часть стока приходится на период весеннего паводка. Разработка карт первой и последней фиксации водной поверхности на пойме даёт возможность определять площадь водной поверхности на произвольную дату без необходимости хранения карт затопления на каждый день половодья. Летние паводки или половодья с несколькими пиками могут вносить неопределённость при подобном подходе, так как возможны ситуации, когда вода неоднократно затапливает пойму и уходит с неё. Решением может стать определение даты первой и последней фиксации водной поверхности в пикселе с учётом непрерывности её безоблачных наблюдений. Перспективным направлением развития подобной системы мониторинга затоплений при половодьях и паводках представляется комплексное использование спутниковых данных разного пространственного и временного разрешения.

Работа выполнена в рамках темы ИКИ РАН «Мониторинг» (госрегистрация № 122042500031-8) с использованием сервиса «Вега-Science» и инфраструктуры Центра коллективного пользования «ИКИ-Мониторинг».

Литература

1. Борщ С. В., Симонов Ю. А., Христофоров А. В., Юмина Н. М. Прогнозирование характеристик половодья 2024 года на реках Ишим, Тобол и Урал // Гидрометеоролог. исслед. и прогнозы. 2024. № 2(392). С. 111–129. DOI: 10.37162/2618-9631-2024-2-111-129.
2. Воронова А. Е., Рублев И. В., Соловьева И. А. др. Спутниковый мониторинг экстремального наводнения в Иркутской области 2019 года // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 1. С. 263–266. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-263-266.
3. Дубина В. А., Шамов В. В., Плотников В. В. Катастрофическое наводнение в Приморье в августе 2018 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2018. Т. 15. № 5. С. 253–256. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-253-256.
4. Зилитинкевич Н. С. Методика расчёта ежедневных площадей заливания района дельты Волги в половодье с использованием спутниковых данных // Исслед. Земли из космоса. 2024. № 3. С. 78–93. DOI: 10.31857/S0205961424030065.
5. Константинова А. М., Лупян Е. А. Анализ последствий прорыва дамбы Сардобинского водохранилища 1 мая 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 261–266. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-261-266.
6. 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., Сычугов И. Г., Толпин В. А., Уваров И. А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
7. Сивохиц Ж. Т., Павлейчик В. М. Современные изменения максимального стока рек бассейна реки Урал // Вестн. Воронежского гос. ун-та. Сер.: География. Геоэкология. 2024. № 2. С. 72–80. DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2024/2/72-80.
8. Сивохиц Ж. Т., Падалко Ю. А. Географо-гидрологические факторы опасных гидрологических явлений в бассейне реки Урал // Изв. Российской акад. наук. Сер. геогр. 2014. № 6. С. 53–61. DOI: 10.15356/0373-2444-2014-6-53-61.
9. Солодовников Д. А., Шинкаренко С. С., Хаванская Н. М., Кукушкина Н. А. Опыт разработки геоинформационной системы пойменных земель Донского бассейна // Юг России: экология, развитие. 2022. Т. 17. № 1(62). С. 151–161. DOI: 10.18470/1992-1098-2022-1-151-161.
10. Терехов А. Г., Абаев Н. Н., Лагутин Е. И. Спутниковый мониторинг Сардобинского водохранилища в бассейне реки Сырдарья (Узбекистан) до и после прорыва дамбы 1 мая 2020 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 3. С. 255–260. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-255-260.
11. Терехов А. Г., Сауров С. Б., Абаев Н. Н. и др. О возможных причинах исключительно больших весенних паводков 2024 года в Казахстане // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 331–338. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-331-338.

12. Трошко К.А., Денисов П.В., Дунаева Е.А. и др. Развитие сельскохозяйственных культур в России в 2024 году на основе данных дистанционного мониторинга // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 4. С. 308–315. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-308-315.
13. Турсунова А.А., Мырзахметов А.Б., Баспакова Г.Р. и др. Историческая справка о гидрологических характеристиках наводнений на реке Жайык // География и водные ресурсы. 2024. № 2. С. 40–51. DOI: 10.55764/2957-9856/2024-2-40-51.11.
14. Чепашев Д.В., Акжаркынова А.Н., Калыбаева А.К., Исхлиева Г.М. Оценка уровенного режима при половодье реки Жайык с применением данных дистанционного зондирования Земли // Вестн. Алматинского ун-та энергетики и связи. 2024. Т. 3. № 66. С. 118–128. DOI: 10.51775/2790-0886_2024_66_3_118.
15. Чибилёв А.А. Бассейн Урала: история, география, экология. Екатеринбург: УрО РАН, 2008. 312 с.
16. Шинкаренко С.С., Барталев С.А. Последствия повреждения плотины Каховской ГЭС на реке Днепр // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 314–322. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-314-322.
17. Шинкаренко С.С., Васильченко А.А. Современное состояние нерестилищ нижнего Дона по данным дистанционного зондирования // Вестн. Московского ун-та. Сер. 5: География. 2023. № 1. С. 16–27. DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.2.
18. Шинкаренко С.С., Барталев С.А., Богодухов М.А. и др. Классификация пойменных земель Нижней Волги на основе многолетних данных дистанционного зондирования и гидрологической информации // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 3. С. 119–135. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-119-135.
19. Шинкаренко С.С., Барталев С.А., Лулян Е.А. Мониторинг последствий наводнения в Оренбургской области при половодье на реке Урал в 2024 году // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 3. С. 339–347. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-339-347.
20. Claverie M., Ju J., Masek J. G. et al. The harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set // Remote Sensing of Environment. 2018. V. 219. P. 145–161. DOI: 10.1016/j.rse.2018.09.002.
21. Jones J. W. Improved automated detection of subpixel-scale inundation—Revised Dynamic Surface Water Extent (DSWE) partial surface water tests // Remote Sensing. 2019. V. 11. No. 4. Article 374. DOI: 10.3390/rs11040374.
22. Loupian E., Burtsev M., Proshin A. et al. Usage experience and capabilities of the VEGA-Science system // Remote Sensing. 2022. V. 14. No. 1. Article 77. DOI: 10.3390/rs14010077.
23. 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.
24. Slayback D., Devadiga S., Kettner A. et al. NASA's updated near real-time global flood product // 2023 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp. 2023. P. 1432–1435. DOI: 10.1109/IGARSS52108.2023.10282015.
25. 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.

Satellite monitoring of the flood in the Ural River basin in 2024

S. S. Shinkarenko, S. A. Bartalev, E. A. Loupian

Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia
E-mail: shinkarenko@d902.iki.rssi.ru

In spring 2024, the floodwaters of the Ural River were characterized by exceptionally high levels, resulting in partial inundation of several cities, including Orsk and Orenburg in Russia, as well as Uralsk in Kazakhstan. The prerequisites for this significant flooding included substantial snowpack, deep soil frost, increased soil moisture, and a sharp warming trend at the end of March following relatively low air temperatures in February and the first half of March. Moderate-resolution satellite data from MODIS enabled the tracking of the flood wave along the Ural River from its upper reaches to

its mouth, as well as on its major tributaries — namely, the Big Kumak, Or', Sakmara, Ilek, Utva, Kindelya, Irtek, and Chagan rivers. This report presents daily floodplain areas and durations of inundation for the Ural River and its tributaries. The area and travel time estimates for the flood wave derived from MODIS data align closely with observations from hydrological stations regarding water levels. The flooding in the upper and middle reaches of the Ural River developed quite rapidly; notably, the initial overflow onto the floodplain was recorded in the southern left tributaries of the Ural, where snowmelt commenced earlier due to latitudinal characteristics compared to the northern right tributaries. Due to an atypically high volume of precipitation during the summer of 2024, elevated water levels on the Ural River were observed until September; however, floodplain inundation during this period was only recorded in the lower reaches of the river. The methodologies employed for mapping the first and last dates of water surface observation on the floodplain, along with subsequent assessments of flood duration and travel time of the flood wave, may be recommended for use in specialized hydrological monitoring systems utilizing remote sensing data.

Keywords: remote sensing, flood, floodplain, Ural River, inundation, monitoring

Accepted: 06.02.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-1-268-282

References

1. Borsch S. V., Simonov Yu. A., Khristoforov A. V., Yumina N. M., Forecasting the characteristics of the flood in 2024 on the Ishim, Tobol and Ural rivers, *Gidrometeorologicheskie issledovaniya i prognozy*, 2024, No. 2(392), pp. 111–129 (in Russian), DOI: 10.37162/2618-9631-2024-2-111-129.
2. Voronova A. E., Rublev I. V., Solov'eva I. A. et al., Satellite observation of extreme flooding in the Irkutsk Region in 2019, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, V. 17, No. 1, pp. 263–266 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-263-266.
3. Dubina V. A., Shamov V. V., Plotnikov V. V., Disastrous flood in August 2018 in Primorye (south Pacific Russia), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2018, V. 15, No. 5, pp. 253–256 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-5-253-256.
4. Zilitinkevich N. S., Methods of calculation of daily flooded areas in the Volga delta during the flood periods based on the remote sensing data, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2024, No. 3, pp. 78–93 (in Russian), DOI: 10.31857/S0205961424030065.
5. Konstantinova A. M., Loupian E. A., Analysis of the consequences of the dam failure of the Sardoba Reservoir on May 1, 2020, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, V. 17, No. 3, pp. 261–266 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-261-266.
6. 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, V. 12, No. 5, pp. 263–284 (in Russian).
7. Sivokhip Z. T., Pavleichik V. M., Current changes in the maximum runoff of the rivers of the Ural River Basin, *Proc. Voronezh State University. Ser.: Geography. Geocology*, No. 2, pp. 72–80 (in Russian), DOI: 10.17308/geo/1609-0683/2024/2/72-80.
8. Sivokhip Z. T., Padalco Yu. A., Geographical and hydrological factors of dangerous hydrological phenomena of the Ural River Basin, *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Ser. Geograficheskaya*, 2014, No. 6, pp. 53–61 (in Russian), DOI: 10.15356/0373-2444-2014-6-53-61.
9. Solodovnikov D. A., Shinkarenko S. S., Khavanskaya N. M., Kukushkina N. A., Developmental experience of the geoinformation system for floodplain lands of the Don Basin, *South of Russia: ecology, development*, 2022, V. 17, No. 1(62), pp. 151–161 (in Russian), DOI: 10.18470/1992-1098-2022-1-151-161.
10. Terekhov A. G., Abaev N. N., Lagutin E. I., Satellite monitoring of the Sardoba Reservoir in Syr Darya River basin (Uzbekistan) before and after a dam collapses on May 1, 2020, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, V. 17, No. 3, pp. 255–260 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-3-255-260.
11. Terekhov A. G., Sairov S. B., Abaev N. N. et al., Possible causes of abnormal spring flooding in Kazakhstan in 2024, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 3, pp. 331–338 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-331-338.
12. Troshko K. A., Denisov P. V., Dunaieva E. A. et al., Development of agricultural crops in Russia in 2024 based on remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 4, pp. 308–315 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-4-308-315.

13. Tursunova A. A., Myrzakhmetov A. B., Baspakova G. R. et al., Historical information on the hydrological characteristics of floods on the Zhaiyk river, *Geografiya i vodnye resursy*, 2024, No. 2, pp. 40–51 (in Russian), DOI: 10.55764/2957-9856/2024-2-40-51.11
14. Chepashev D. V., Akzharkynova A. N., Kalybaeva A. K., Isklieva G. M., Assessment of the water level regime during the flood of the Zhayik river using earth remote sensing data, *Vestnik Almatinskogo universiteta energetiki i svyazi*, 2024, V. 3, No. 66, pp. 118–128 (in Russian), DOI: 10.51775/2790-0886_2024_66_3_118
15. Chibilev A. A., *Bassein Urala: istoriya, geografiya, ekologiya* (The Ural Basin: history, geography, ecology), Ekaterinburg: UrO RAN, 2008, 312 p. (in Russian).
16. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., The consequences of damage to the Kakhovka Reservoir dam on the Dnieper River, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 3, pp. 314–322 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-314-322.
17. Shinkarenko S. S., Vasil'chenko A. A., Actual state of the lower don spawning grounds according to remote sensing data, *Vestnik Moskovskogo universiteta. Ser. 5: Geografiya*, 2023, No. 1, pp. 16–27 (in Russian), DOI: 10.55959/MSU0579-9414.5.78.1.2.
18. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Bogodukhov M. A. et al., The Lower Volga floodplain classification based on long-term hydrological and remote sensing data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 3, pp. 119–135 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-3-119-135.
19. Shinkarenko S. S., Bartalev S. A., Loupian E. A., Monitoring the consequences of flooding in Orenburg Region during spring flood on the Ural River in 2024, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2024, V. 21, No. 3, pp. 339–347 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-3-339-347.
20. Claverie M., Ju J., Masek J. G. et al., The harmonized Landsat and Sentinel-2 surface reflectance data set, *Remote Sensing of Environment*, 2018, V. 219, pp. 145–161, DOI: 10.1016/j.rse.2018.09.002.
21. Jones J. W., Improved automated detection of subpixel-scale inundation—Revised Dynamic Surface Water Extent (DSWE) partial surface water tests, *Remote Sensing*, 2019, V. 11, No. 4, Article 374, DOI: 10.3390/rs11040374.
22. Loupian E., Burtsev M., Proshin A. et al., Usage experience and capabilities of the VEGA-Science system, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, No. 1, Article 77, DOI: 10.3390/rs14010077.
23. 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, pp. 418–422, DOI: 10.1038/nature20584.
24. Slayback D., Devadiga S., Kettner A. et al., NASA's updated near real-time global flood product, *2023 IEEE Intern. Geoscience and Remote Sensing Symp.*, 2023, pp. 1432–1435, DOI: 10.1109/IGARSS52108.2023.10282015.
25. 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, pp. 719–728, DOI: 10.1134/S0097807820060135.