

Применение данных дистанционного зондирования для анализа водного режима р. Анадырь в условиях недостаточности данных

Д. И. Школьный¹, Е. И. Бахарева¹, П. П. Головлев¹,
А. С. Цыпленков¹, Е. А. Захарова², М. А. Самохин¹

¹ *Московский государственный университет
имени М. В. Ломоносова Москва, 119991, Россия*

² *Институт водных проблем РАН, Москва, 119333, Россия
E-mail: danila.hydro@yandex.ru*

Река Анадырь является ключевой водной артерией Чукотки и имеет важное транспортное значение, однако её гидрологическая изученность остаётся крайне низкой: после 1997 г. в бассейне отсутствуют наблюдения за стоком, наблюдения за уровнем недостаточны, а последние лоцманские карты датируются 1993 г. Это осложняет оценку водного режима и обеспечение судоходства, особенно в пределах Анадырь-Майнского разветвления — сложной многоуровневой системы, аккумулирующей значительные объёмы половодных вод. Так, при создании современных лоцманских карт в 2022 г. возникли проблемы, связанные с определением проектных уровней воды из-за недостаточности данных. Несоответствие глубин и уровней может привести к аварийным ситуациям. В работе использованы данные дистанционного зондирования Земли, сопоставленные с материалами экспедиций 2020–2024 гг. По снимкам космического аппарата Sentinel-2 выполнено картирование затопленных территорий и выявлены связи между площадью водной поверхности и уровнями воды на гидрологических постах: в половодье площадь увеличивается в 3,5–4,0 раза, а надёжными предикторами затопления становятся суммы уровней за 15–21 сут. предшествующих дате съёмки. С применением цифровой модели рельефа FABDEM (*англ.* Forest And Buildings removed Copernicus DEM) и промеров глубин рассчитан объём аккумуляции воды — до 19,4 км³, что сопоставимо с половиной годового стока реки. Спутниковая альтиметрия (Jason-3, Sentinel-3A) показала высокое соответствие наземным наблюдениям (с коэффициентом детерминации R^2 до 0,96) и позволила восстановить продольную изменчивость уровней. Полученные результаты продемонстрировали высокую информативность и взаимодополняемость данных ДЗЗ при исследовании арктических рек с недостаточной наблюдательной сетью и создали основу для дальнейшего исследования Анадырь-Майнского разветвления.

Ключевые слова: Анадырь, водный режим, дистанционное зондирование, Sentinel-2, MNDWI, FABDEM, спутниковая альтиметрия, уклон водной поверхности

Одобрена к печати: 10.02.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-290-303

Введение

В последние десятилетия во всём мире отмечается сокращение сети гидрологических наблюдений, что особенно заметно на труднодоступных арктических и субарктических территориях. Дефицит наземных данных снижает применимость традиционных методов анализа водного режима и стимулирует использование альтернативных подходов, основанных на данных дистанционного зондирования Земли. Такие данные позволяют выполнять косвенную оценку характеристик стока, а также анализировать продольные профили водной поверхности и уровеньный режим рек.

Одним из перспективных инструментов выступает спутниковая альтиметрия, изначально разработанная для мониторинга океана и всё активнее применяемая для определения уровней внутренних водоёмов (Abdalla et al., 2021). Однако её использование в арктических условиях осложняется наличием ледового покрова и сложной морфометрией речных долин. Основная проблема обработки сигнала связана с пространственной неравномерностью шероховатости подстилающей поверхности, что требует применения специализированных алго-

ритмов фильтрации, включая методы машинного обучения (Семенова и др., 2024). В то же время оптические и радиолокационные снимки демонстрируют высокую эффективность при валидации площадей затопления и верификации гидродинамических моделей, что было показано, например, для рек Колымы и Лены, где совместное использование спутниковых данных и гидродинамических моделей позволило воспроизвести характеристики водного режима на протяжённых участках в пределах арктической зоны (Захарова и др., 2023).

Река Анадырь, протекающая на Чукотском полуострове, выступает примером крупной водной артерии, для которой практически отсутствуют современные данные наблюдений за стоком (полностью прекращены с 1997 г.), а наблюдения за уровнем не обеспечивают необходимое количество информации о режиме реки из-за особенностей расположения наблюдательной сети, несмотря на важное транспортное значение реки, обеспечивающей завоз топлива и грузов в удалённые населённые пункты. В 2023 г. судоходные участки Анадыря (550 км от устья) были включены в Перечень внутренних водных путей РФ, однако гидрографическое обеспечение остаётся недостаточным: старые лоцманские карты глубин 1993 г. выпуска и ранее недостаточно точны, навигационная обстановка по состоянию на 2025 г. отсутствует; выпущенная в 2023 г. новая лоцманская карта содержит значительные ошибки (в основном, глубины завышены относительно реально наблюдаемых), связанные с отсутствием информации о трансформации уровней на судоходном участке и неудачным расположением опорных постов. В результате судоходство осуществляется с повышенным риском (Школьный и др., 2025).

Объектом детального исследования настоящей работы является Анадыро-Майнское разветвление, объединяющее р. Анадырь, её крупный приток Майн и ряд меньших протоков. Оно расположено в пределах Парапольско-Бельской низменности в среднем течении реки. Участок отличается специфическим гидрологическим режимом и сложной морфологией русла. Здесь Анадырь протекает в широкой полосе блуждания, формируя обширное водноболотное угодье с большим количеством озёр и протоков. Небольшой уклон межпроточного пространства и узость замыкающего створа (на слиянии двух основных рек) способствуют аккумуляции значительных объёмов паводочных вод, что приводит к затоплению до 5100 км² поймы и формированию специфических условий прохождения паводков. Низкие меженные уровни, разветвлённая сеть протоков и активные русловые деформации дополнительно осложняют навигацию.

В этих условиях данные дистанционного зондирования Земли становятся ключевым источником информации о динамике водной поверхности и русловых процессах. Спутниковые изображения Sentinel-2 позволили детально картировать площади затопления, а использование платформы Google Earth Engine обеспечило эффективную обработку больших объёмов данных и вычисление водных индексов. Альтиметрические измерения миссий Jason-3 и Sentinel-3A дополнили анализ, дав возможность восстановить продольные изменения уровня воды в различных условиях водности.

С учётом недостатка продолжительных рядов гидрологических наблюдений цель работы заключается в получении и анализе информации о водном режиме Анадыро-Майнского разветвления преимущественно на основе данных дистанционного зондирования, сопоставленных с материалами полевых экспедиций 2020–2022 гг. Комплексный подход, объединяющий спутниковые снимки, альтиметрию и натурные измерения, позволяет восполнить существенные пробелы в гидрологической изученности участка.

Материалы и методы

Исходные данные гидрологических наблюдений

Бассейн р. Анадырь характеризуется низкой обеспеченностью современными гидрологическими наблюдениями. Действующая сеть постов существенно сократилась по сравнению с советским периодом, и на ряде участков данные о расходе и уровнях воды отсутствуют уже

несколько десятилетий. Непрерывные измерения расхода полностью прекращены в 1997 г., что существенно ограничивает возможности анализа водного режима. В настоящее время в бассейне функционируют 5 постов, на которых ведутся уровенные наблюдения. В ходе работы были собраны архивные материалы многолетних наблюдений по 13 гидрологическим постам бассейна (табл. 1), включая сведения о среднем декадном и месячном расходе воды, а также суточных уровнях, предоставленные Анадырской гидрометеообсерваторией.

Таблица 1. Список постов гидрологических наблюдений в бассейне р. Анадырь

| Река/пункт | Период собранных данных | | | | Площадь водо-сбора, км ² |
|---|-------------------------|-----------------------|------------------|----------------------|-------------------------------------|
| | Расход воды | | | Уровни воды в период | |
| | ежедневный | ежедневный, всего лет | средний декадный | | |
| р. Анадырь/с. Ламутское | 1978–1986; 1989 | 10 | – | 1958–1996 | 16 400,0 |
| р. Анадырь/пос. Новый Еропол | 1958–1989; 1991–1996 | 38 | 1958–1984 | 1957–2025 | 47 300,0 |
| р. Анадырь/с. Марково | – | – | – | 1957–2025 | 50 700,0 |
| р. Анадырь/база Крепость | 1974–1986; 1988–1989 | 15 | – | 1975–1990 | 55 100,0 |
| р. Анадырь/с. Снежное | 1958–1989; 1991–1994 | 36 | 1958–1984 | 1957–1995 | 106 000,0 |
| р. Анадырь/с. Усть-Белая | – | – | – | 2000–2025 | 111 000,0 |
| р. Анадырь/в 3 км выше устья р. Утесики | 1974–1986; 1988–1989 | 15 | – | 1974–1990 | 156 000,0 |
| р. Еропол/с. Чуванское | 1982; 1993–1994 | 3 | 1976–1984 | 1958–2025 | 8 360,0 |
| р. Куйвиеем/с. Чуванское | 1967–1970; 1993–1994 | 7 | – | 1966–1995 | 523,0 |
| р. Майн/с. Ваеги | 1979–1982 | 4 | 1974–1984 | 1957–2025 | 18 600,0 |
| руч. Совхозный/с. Снежное | 1958–1967; 1969–1970 | 12 | 1967–1984 | 1958–1994 | 13,2 |
| р. Эньмувеем/ГМС Эньмувеем | 1958–1970 | 13 | 1958–1984 | 1957–2025 | 11 400,0 |
| р. Танюрер/ГМС Танюрер | 1982 | 1 | 1976–1980 | 1976–1993 | 18 500,0 |

Примечание: ГМС — гидрометеорологическая станция.

Трудности с интерпретацией данных связаны как с неравномерным распределением наблюдательной сети, так и с нерепрезентативностью расположения постов по отношению к современной морфологии русла (рис. 1, см. с. 293). Уровенные посты полностью отсутствуют в нижнем течении реки: замыкающий пост Утёсики (185 км от устья) прекратил работу в 1993 г., и участок от устья до с. Усть-Белая остаётся вне мониторинга. Аналогичный разрыв наблюдений отмечается между с. Снежным и базой Крепость, что затрудняет оценку стока на разветвлённом участке. На данные поста Усть-Белая, единственного действующего на судоходном участке, значительно влияет водный режим впадающей здесь р. Белой, значительно отличающийся от режима Анадыря. Другой опорный пост в с. Марково расположен на старой протоке на участке многорукавного русла, в связи с чем уровни с этого поста репрезентативны только в высокую воду, при активизации системы рукавов. Общее качество наблюдений и оснащения постов в бассейне также невелико. Ранее ключевыми створами были база Крепость (верхняя граница доступного для судов участка) и Утёсики (нижняя граница естественного участка реки на створе проникновения максимальных приливов), однако измерения там более не выполняются.

Полевые наблюдения 2024 г. с помощью самописцев уровня показали, что уровни воды в створе закрытого поста Крепость в фазу спада половодья снижаются примерно вдвое быстрее, чем на посту Усть-Белая. После остановки падения уровней на посту Марково, проис-

ходящего в начале июля после спада половодья, меженная амплитуда уровней ниже по течению в створе Крепости, в устье р. Майн и на посту Усть-Белая составляет ещё 2 м. Вследствие этого использование для судоходства уровенных данных этих постов сопряжено с высокой неопределённостью: трансформация русла и значительное время добега паводков приводят к ошибкам при определении проектных глубин и осложняют восстановление уровенных рядов.

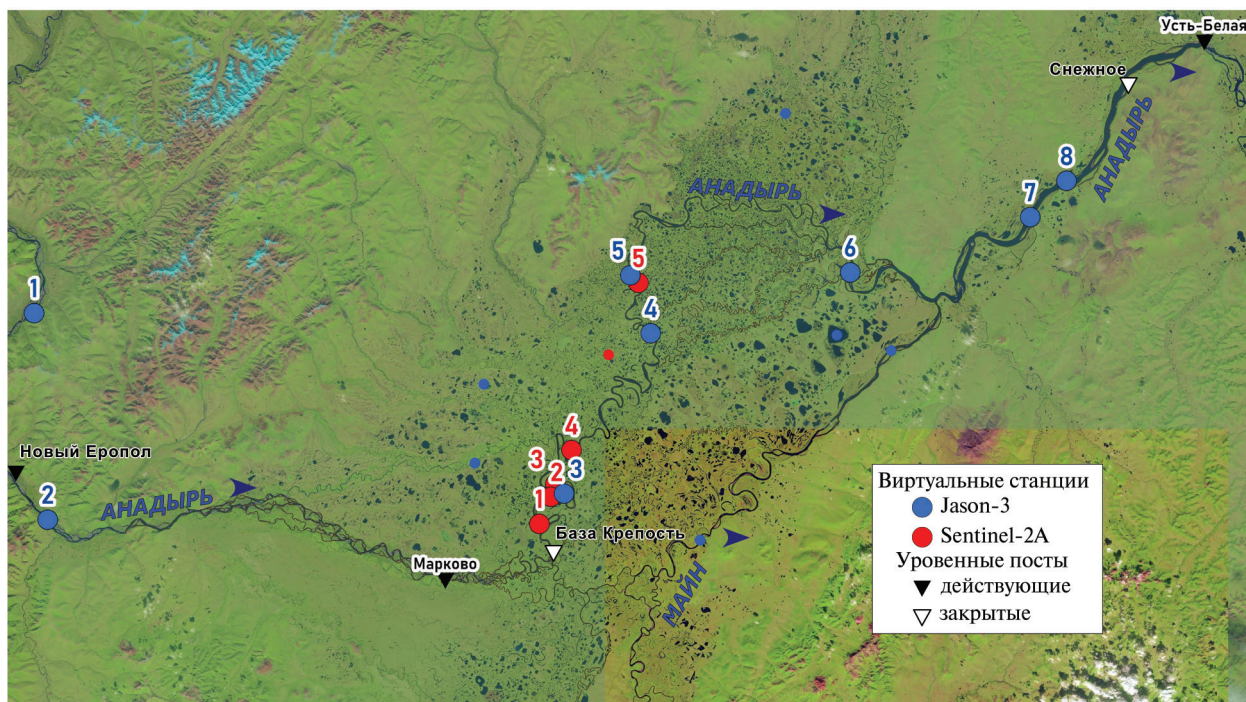


Рис. 1. Расположение виртуальных станций альтиметрических спутников Jason-3 и Sentinel-3A и гидрологических постов в пределах Анадыро-Майнского разветвления

Картирование затопления по данным Sentinel-2

Для оценки площадей затопления использовались мультиспектральные снимки Sentinel-2. Выделение водной поверхности выполнялось с применением спектральных индексов $NDWI_{McFeeters}$ (англ. Normalized Difference Water Index), по формуле С.К. Макфитерса (McFeeters, 1996) и $NDWI_{Gao}$, по формуле Б. Гао (Gao, 1996); $MNDWI$ (англ. Modified Normalized Difference Water Index) (Xu, 2006); $AWEI_{sh}$ (англ. Automated Water Extraction Index with Shadows) (Feyisa et al., 2014), эффективность которых оценивалась на тестовом участке Анадыро-Майнского разветвления площадью $21,6 \text{ км}^2$ по матрице ошибок. Классифицированные изображения сопоставлялись с эталонной картой, оцифрованной вручную по детальному космическому снимку WorldView-2 за дату, аналогичную обрабатываемому снимку Sentinel (табл. 2).

Наиболее устойчивые результаты продемонстрировали индексы $AWEI_{sh}$ и $MNDWI$. С учётом анализа накопленного опыта дешифрирования снимков с похожими целями (Albertini et al., 2022; Du et al., 2016; Huang et al., 2018; Zhang, Weng, 2016), чувствительности индекса $AWEI_{sh}$ к пороговому значению и полученных тестовых оценок для дальнейшего картирования затопления был выбран индекс $MNDWI$.

Построение композитов Sentinel-2 и вычисление $MNDWI$ осуществлялись в облачной платформе Google Earth Engine, что обеспечило эффективную обработку больших объёмов данных (Gorelick et al., 2017). Всего было проанализировано 60 безоблачных и частично облачных снимков за 2017–2023 гг.

Таблица 2. Матрица ошибок индексов водной поверхности для участка Анадырь-Майнского разветвления (снимок Sentinel-2 за 11.06.2019)

| | | Эталонная карта | | | | | |
|--------------------------|---------------------------|-----------------|----------|-----------------|---|-------|--|
| | Класс | Вода | Без воды | Итого по строке | Погрешность определения относительно эталона, % | | |
| | | | | | водной поверхности | общая | |
| Классифицированная карта | NDWI _{McFeeters} | | | | | | |
| | Вода | 3,0 | 0,2 | 3,2 | 24,0 | 5,3 | |
| | Без воды | 1,0 | 17,4 | 18,4 | | | |
| | Итого по столбцу | 4,0 | 17,6 | 21,6 | | | |
| | NDWI _{Gao} | | | | | | |
| | Вода | 1,8 | 0,3 | 2,1 | 55,6 | 11,8 | |
| | Без воды | 2,2 | 17,3 | 19,5 | | | |
| | Итого по столбцу | 4,0 | 17,6 | 21,6 | | | |
| | AWEI _{sh} | | | | | | |
| | Вода | 3,4 | 0,4 | 3,7 | 15,3 | 4,6 | |
| | Без воды | 0,6 | 17,2 | 17,8 | | | |
| | Итого по столбцу | 4,0 | 17,6 | 21,6 | | | |
| | MNDWI | | | | | | |
| | Вода | 3,2 | 0,3 | 3,4 | 20,2 | 5,0 | |
| | Без воды | 0,8 | 17,3 | 18,1 | | | |
| Итого по столбцу | 4,0 | 17,6 | 21,6 | | | | |

Оценка объёмов затопления по цифровой модели рельефа FABDEM и полевым данным

Для оценки объёмов воды, аккумулируемой на пойме в период половодья, была построена композитная модель рельефа. В её основе использована ЦМР FABDEM с разрешением 30 м (Hawker et al., 2022), показавшая более стабильные результаты по сравнению с ЦМР ArcticDEM (2 м), которая содержала ошибки, приуроченные к водной поверхности термокарстовых озёр, и артефакты на плоских участках.

Рельеф русла реконструирован по оцифрованным лоцманским картам 1993 г. и верифицирован и дополнен по промерам глубин, выполненным в ходе экспедиций 2021–2024 гг. В крупных протоках, где промеры отсутствовали, для расчёта объёма применялся переходный коэффициент на удельный объём единицы длины, рассчитанный по доле измеренного расхода в протоке относительно изученной протоки Луковой (с известным объёмом).

Расчёт объёмов затопления проводился в QGIS с использованием скрипта PyQGIS_Hydro* на основе кривой объёмов, ограниченной установленным по спутниковым данным уровнем максимального затопления (19,8 мБС, Балтийская система высот).

Данные спутниковой альтиметрии

Для восстановления уровенного режима на участках, не охваченных наземной наблюдательной сетью, использовались данные спутниковой альтиметрии. В работе применялись измерения миссий Jason-3 (периодичность 10 дней) и Sentinel-3A (27 дней). Для р. Анадырь доступны наблюдения на семи виртуальных станциях, соответствующих точкам пересечения

* https://github.com/jvdkwast/PyQGIS_Hydro.

русла треками спутника Jason-3, и пяти станциях для миссии Sentinel-3A (см. рис. 1). Период использованных наблюдений составляет 5 лет для Jason-3 (2016–2020) и 8 лет для Sentinel-3A (2016–2023).

Обработка данных включала фильтрацию выбросов и приведение альтиметрических высот к единой системе отсчёта. Виртуальные станции выбирались таким образом, чтобы радиолокационный сигнал отражался преимущественно от водной поверхности: точки измерений располагались в центральной части русла и не попадали на участки отмелей или перекаатов, что проверялось по меженным снимкам Sentinel-2. Такой подход позволил минимизировать ошибки, связанные с отражением сигнала от неоднородной подстилающей поверхности (льда, берегов, мелководных участков).

Результаты и их обсуждение

Взаимосвязи уровня режима на гидрологических постах

Анализ уровня режима Анадыро-Майнского разветвления по данным четырёх действующих гидрологических постов — Новый Еропол, Марково, Усть-Белая на р. Анадырь и Ваеги на р. Майн — показал наличие устойчивых связей временного хода уровней воды между постами.

Для определения времени добегания паводочной волны (τ , сут) между верхними створами (Новый Еропол, Марково, Ваеги) и замыкающим створом (Усть-Белая) были построены совмещённые графики колебаний уровней за летний период. Методика включала выборку соответствующих максимумов уровней и определение сроков их наступления.

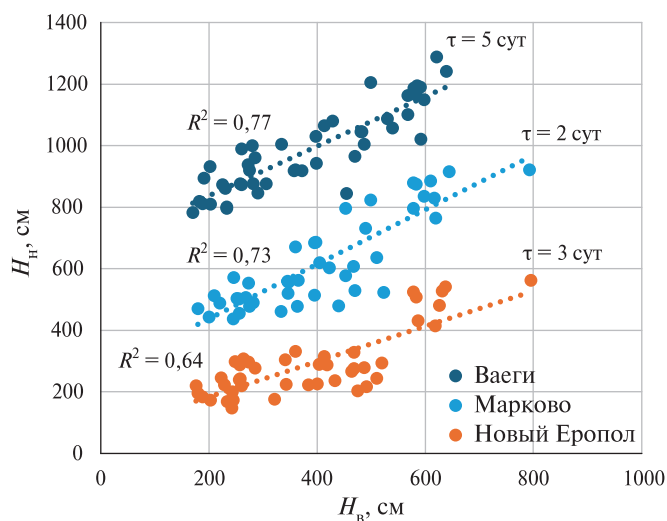
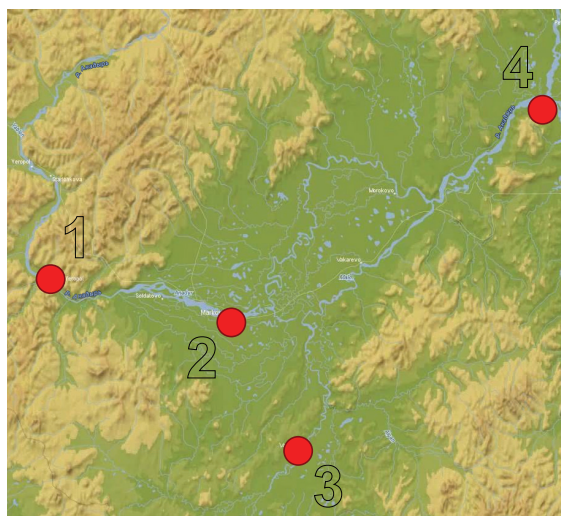


Рис. 2. Расположение уровненых постов на границе Анадыро-Майнского разветвления (1 — Новый Еропол; 2 — Марково; 3 — Ваеги; 4 — Усть-Белая) (слева) и зависимости соответственных уровней между верхними постами H_B и замыкающим створом Усть-Белая H_N за 2011–2021 гг.; τ — время добегания паводочной волны (справа)

Анализ линейной зависимости между уровнями на верхнем (H_B) и нижнем (H_N) по течению постах вида $H_{N,t+\tau} = f(H_{B,t})$ показал, что время добегания существенно варьирует в зависимости от фазы водного режима. Соответственные уровни анализировались посредством построения линейной связи между значениями с различным шагом в сутках и подбора шага с наилучшим коэффициентом детерминации R^2 . Лучшие связи соответствуют времени добегания около 3 сут между Усть-Белой и Новым Ерополом, около 2 сут между Усть-Белой и Марково, и порядка 5 сут между Усть-Белой и постом Ваеги на р. Майн (рис. 2). Эти

значения, с одной стороны, отражают пространственное положение постов в русловой сети и вклад приточности, с другой стороны — демонстрируют недостаточную репрезентативность наблюдаемых на постах уровней относительно сложного водного режима реки, так как действительное время добега даже с учётом средней скорости в половодье для Ваег значительно меньше, а для Марково и Еропола — больше.

Связи уровня режима с площадями и объёмами затопления

Для оценки взаимосвязей площадей водной поверхности, объёмов затопления и уровней воды были использованы результаты картирования затопленных территорий по снимкам Sentinel-2 и расчёты объёмов пойменной аккумуляции воды по композитной модели рельефа. Анализ площадей затопления показал, что в период половодья (июнь) площадь водной поверхности увеличивается в 3,5–4,0 раза по сравнению с меженным периодом. Наиболее значительное увеличение площади затопления наблюдается на правобережной пойме Анадыря (протоки Луковая, Большая Новая, Средняя, Морокова), а также на левобережной пойме протоки Мамолиной в южной части разветвления (рис. 3).

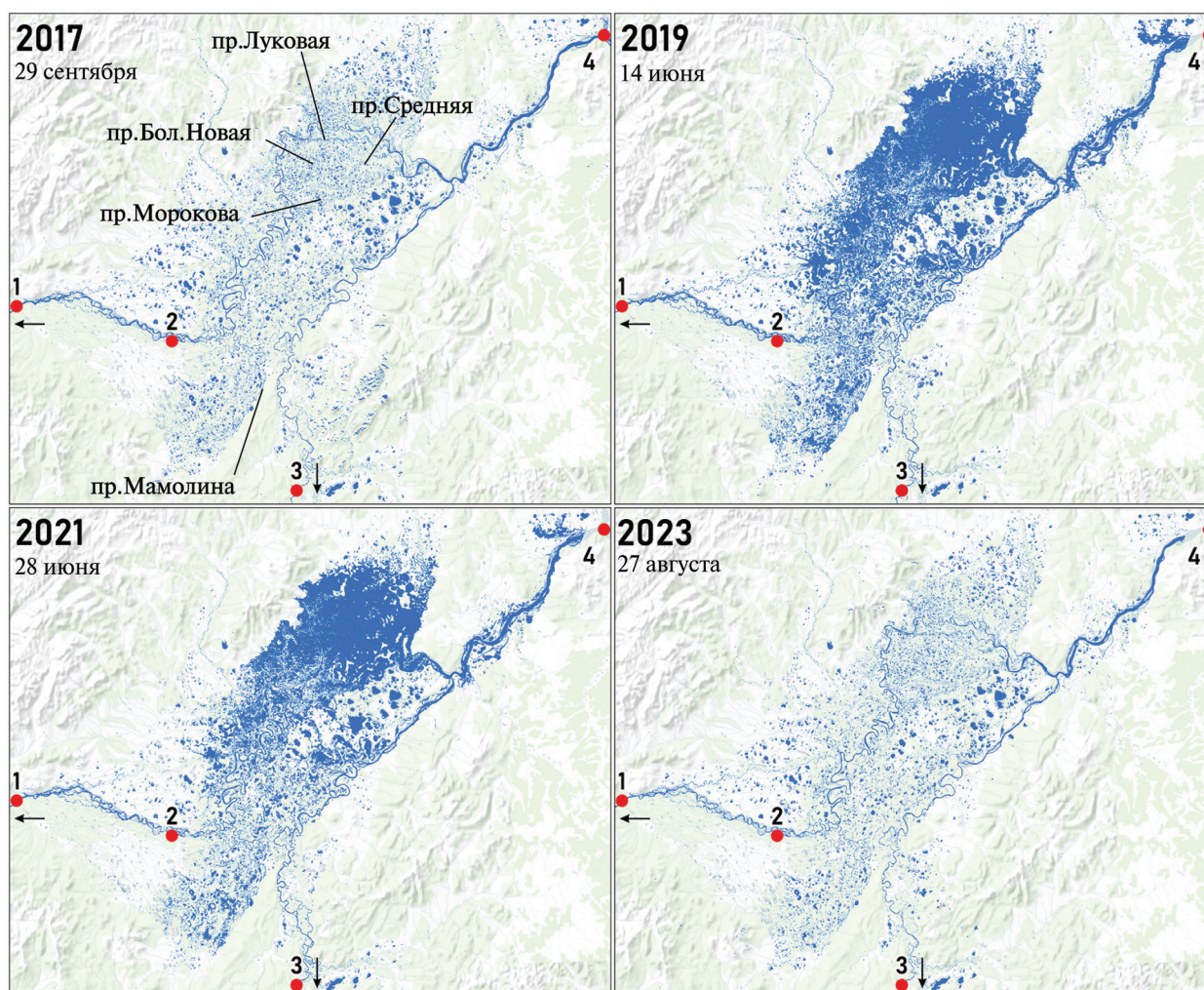


Рис. 3. Площадь водной поверхности, выделенная по индексу MNDWI в пределах Анадыря-Майнского разветвления по данным Sentinel-2 за разные даты (указаны гидрологические посты: 1 — Новый Еропол; 2 — Марково; 3 — Ваеги; 4 — Усть-Белая, стрелками показано положение постов за границами области)

На рис. 4 слева представлены связи площади затопления с уровнями воды на постах с учётом времени добегания τ , а справа — от сумм абсолютных уровней, приведённых к Балтийской системе высот, рассчитанных за интервал N сут, предшествующий дате съёмки. Исследование зависимости площади водной поверхности (F , км²) от уровней воды на постах выявило, что, несмотря на определённое ранее по графикам соответственных уровней время добегания (2–5 сут), наиболее тесную корреляционную связь демонстрируют уровни, взятые с большей заблаговременностью — 7–12 сут до даты съёмки. Ещё более устойчивые зависимости получены при использовании в качестве предиктора суммы абсолютных уровней на постах за определённый интервал, что позволяет учесть подпорные условия и длительную аккумуляцию воды на пойме. Оптимальное окно суммирования составляет 15 сут для поста Марково, 19 сут для Нового Еропола и 21 сут для Ваег. Наилучший результат ($R^2 = 0,94$ для связи $F = 14,47 \left[\sum_1^{-15} H_{\text{Марково}} + \sum_1^{-22} H_{\text{Ваеги}} \right] - 15935,86$ Школьный-eqn-01 получен при совместном использовании сумм уровней Марково и Ваеги — как характеристики общего поступления воды в разветвление из двух основных источников, составляющих около 80 % от общего расхода на его замыкающем створе (Чалов, Школьный, 2025).

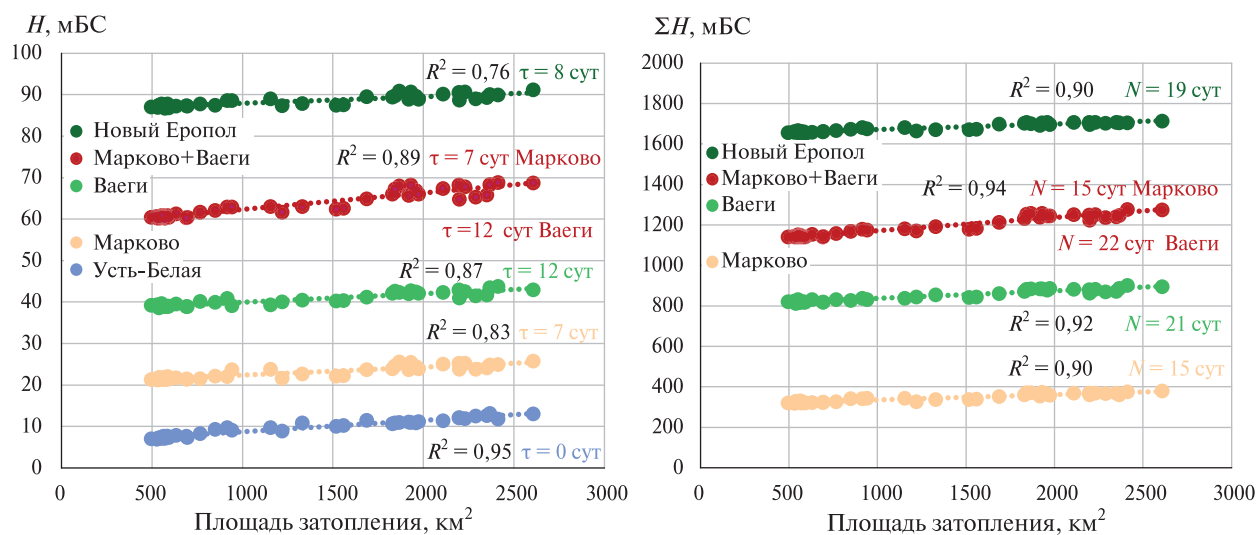


Рис. 4. Зависимость площади затопления верхнего участка Анадыро-Майнского разветвления от уровней воды (слева) и от сумм уровней (справа) — на гидропостах Новый Еропол, Марково, Ваеги и Усть-Белая за 2017–2021 гг. с указанием лага (τ) и периода суммирования (N)

Характер выявленных зависимостей обусловлен гидравлическими особенностями района. Сужение долины в месте впадения р. Майн формирует эффект «бутылочного горла», вызывая подпор и длительное удержание высоких уровней, что приводит к растянутому половодью и значительному объёму пойменной аккумуляции воды.

Полученные зависимости были успешно верифицированы на независимых данных за 2022–2023 гг. Прогноз площади затопления по суммам уровней на посту Марково (окно 15 сут) показал высокую точность ($R^2 = 0,97$, средняя абсолютная ошибка — 9,9 %, рис. 5, см. с. 298). Для южного участка разветвления (пойма Мамолиной) коэффициенты детерминации также высоки ($R^2 = 0,86...0,90$), что подтверждает сложное взаимодействие потоков Анадыря и Майна и формирование единой гидравлической системы. Установлено, что активное затопление начинается через 8–10 сут после прохождения паводочных пиков на вышележащих створах и может продолжаться до полутора месяцев.

Рассчитанный объём воды, аккумулированный в разветвлении на максимуме половодья (2018), составил 19,4 км³ — это около 40 % от объёма стока р. Анадырь за этот год в створе с. Снежное (31,6 км³), расположенном в 58 км ниже слияния рек (рис. 6, см. с. 298). Анализ

соотношения русловой и пойменной ёмкости показал, что в основных руслах Анадыря, Майна и крупных проток содержится лишь $0,5 \text{ км}^3$ воды, или $2,7 \%$ общего объёма затопления. Отношение площади разлива к площади русел в пределах бровок достигает $1:15$, причём основные объёмы воды сосредоточены на правобережной пойме Анадыря и в междуречье проток Луковая и Морокова. Это подтверждает роль Анадыро-Майнского разветвления как естественного регулятора стока.

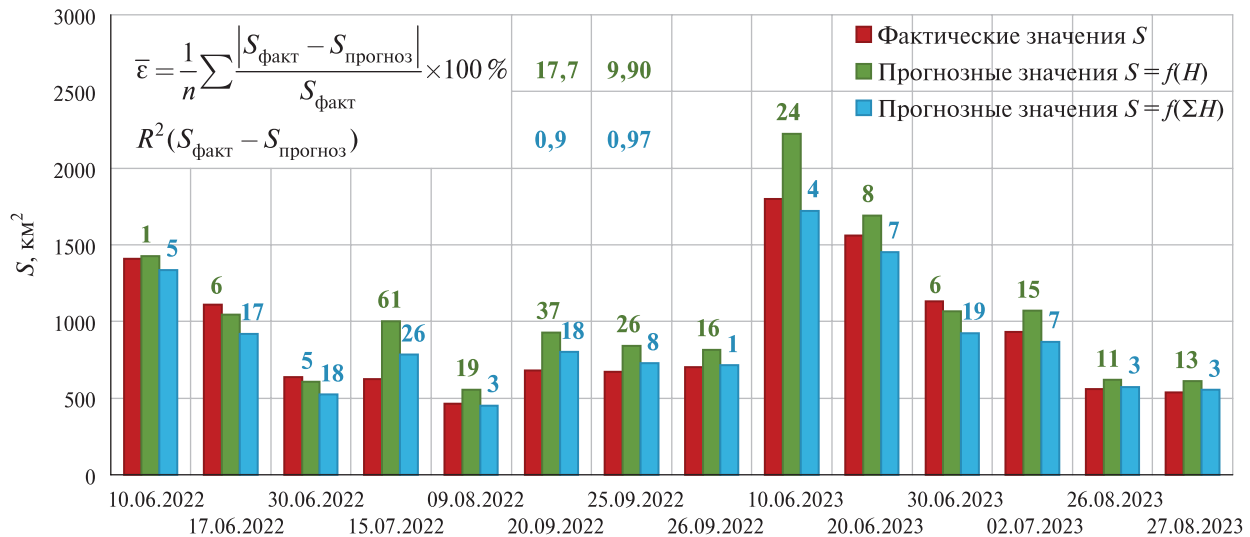


Рис. 5. Фактические и прогнозные значения площади затопления (с указанием ошибок) для верхнего участка Анадыро-Майнского разветвления в 2022–2023 гг.

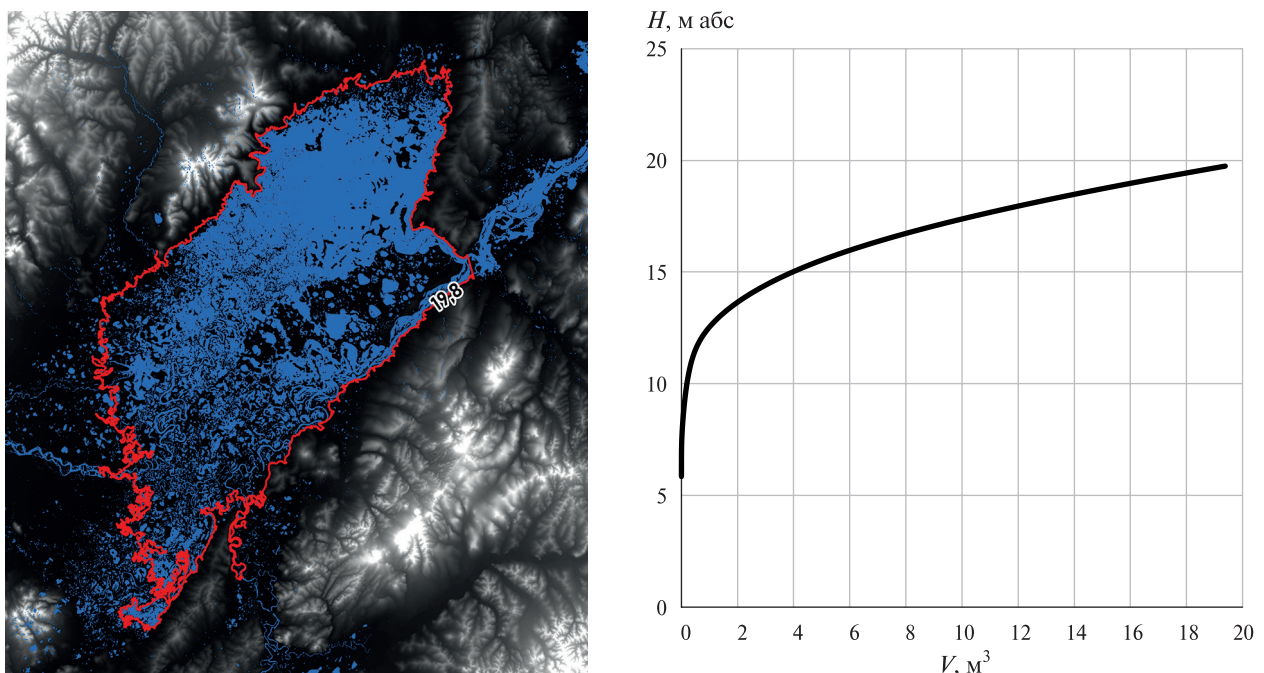


Рис. 6. Предельное затопление (слева) и кривая объёмов воды (справа)

Сопоставление временного хода объёмов затопления, площадей водной поверхности и уровней воды на посту Усть-Белая за 2017–2022 гг. показало тесные зависимости между параметрами: $R^2 = 0,96$ для объёма и $R^2 = 0,95$ для площади относительно уровня соответственно. Полученные зависимости указывают на возможность использования наблюдений уровня в замыкающем створе для оперативной оценки масштабов затопления.

Сопоставление спутниковой альтиметрии с наземными наблюдениями

Использование спутниковой альтиметрии миссий Jason-3 и Sentinel-3A позволило получить данные об уровнях воды на участках, не охваченных наземной сетью наблюдений (см. рис. 1). Сравнение с уровнями на постах показало, что данные Jason-3 наиболее хорошо согласуются с наблюдениями на посту Усть-Белая: для ближайшей к нему виртуальной станции $R^2 = 0,96$ при среднеквадратическом отклонении около 1,4 м (рис. 7). По мере увеличения расстояния между виртуальной станцией и постом степень согласованности снижается. Для поста Марково связи не такие выраженные, для р. Майн связь между уровнями Jason-3 и постом Ваеги практически отсутствует из-за влияния притоков и перераспределения стока в системе проток.

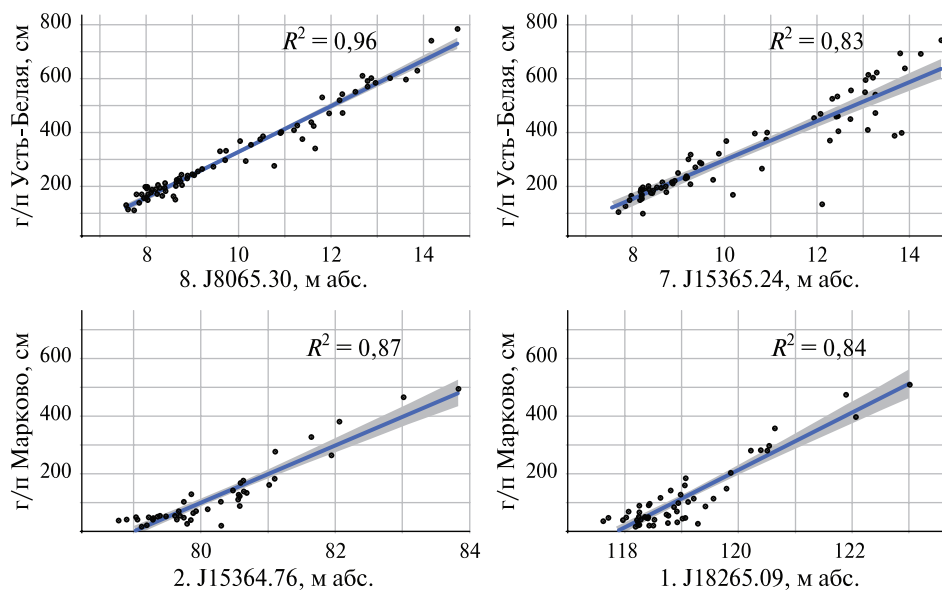


Рис. 7. Связь уровней воды на гидропостах Усть-Белая и Марково (в см усл) от измерений на виртуальных станциях Jason-3 (в м абс) с учётом времени добегаания ($\tau = 1$ сут)

Данные Sentinel-3A, треки которого проходят непосредственно внутри разветвления, характеризуются меньшей степенью согласованности с постом Марково ($R^2 = 0,39...0,63$). Это связано с высокой неоднородностью отражающей поверхности: внутри разветвления альтиметрический сигнал искажается при отражении от участков затопленной поймы и островов. Тем не менее спутник корректно воспроизводит сезонную динамику уровней и фазы гидрографа, что подтверждает возможность использования данных Sentinel-3A для оценки временных характеристик водного режима.

Значимым результатом анализа стало сопоставление альтиметрических уровней с площадями затопления, определёнными по снимкам Sentinel-2. Для трёх виртуальных станций Jason-3 в верхней части Анадыро-Майнского разветвления выявлена очень высокая степень согласованности между высотой водной поверхности и площадью водного зеркала ($R^2 = 0,99$, рис. 8, см. с. 300). Чем выше по течению расположена виртуальная станция, тем меньший уровень воды необходим для достижения той же площади затопления. Это отражает устойчивость гидрологических характеристик верхней части разветвления и подтверждает согласованность результатов, полученных различными методами дистанционного зондирования.

Анализ продольных профилей водной поверхности по данным Jason-3 и Sentinel-3A выявил существенные различия в амплитуде колебаний уровней вдоль русловой сети (рис. 9, см. с. 300). Если в верхнем створе (станция 2 Jason-3) средний перепад уровней составляет около 3,6 м, то в нижней части участка (станция 7) он достигает 5,0 м, а внутри разветвления по данным Sentinel-3A — до 6,2 м, что связано с подпором и длительной аккумуляцией воды на пойме.

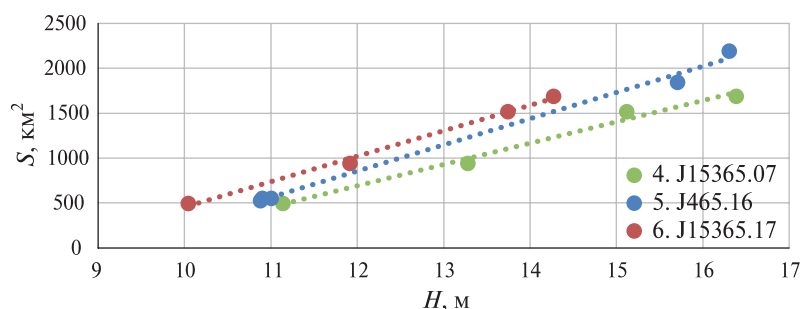


Рис. 8. Зависимость площади затопления верхнего участка Анадыро-Майнского разветвления от альтиметрических уровней на трёх виртуальных станциях Jason-3

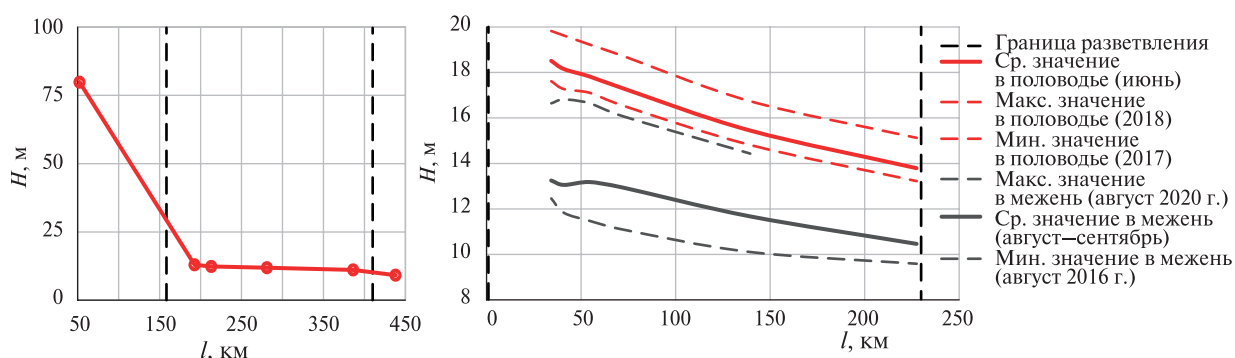


Рис. 9. Продольные профили альтиметрических уровней водной поверхности по руслу р. Анадырь: по данным спутников Jason-3 (слева) и Sentinel-3A (справа); вертикальными пунктирными линиями показана граница Анадыро-Майнского разветвления

Таким образом, альтиметрические данные существенно дополняют наземные наблюдения, позволяя выявить пространственные особенности уровенного режима, оценить трансформацию паводочных волн внутри разветвления и подтвердить механизмы пойменной аккумуляции воды, ранее установленные по данным космических снимков. Комплексное использование нескольких миссий ДЗЗ обеспечивает целостное представление о гидродинамике Анадыро-Майнского разветвления, что невозможно при опоре исключительно на редкую сеть гидрологических постов.

Выводы

Выполненное исследование подтверждает высокую информативность данных ДЗЗ для анализа водного режима крупных рек в условиях недостатка наземных наблюдений. Комплексное использование мультиспектральных снимков Sentinel-2, спутниковой альтиметрии (Jason-3, Sentinel-3A) и цифровых моделей рельефа позволило получить новые характеристики Анадыро-Майнского разветвления.

Установлено, что данные ДЗЗ позволяют с высокой точностью восстанавливать уровенный режим неизученных участков. Альтиметрические измерения демонстрируют хорошее соответствие наземным данным (R^2 до 0,96), а оптические снимки Sentinel-2 обеспечивают детальное картирование динамики затопления. Между площадями затопления и уровнями воды на вышележащих постах выявлена устойчивая связь (R^2 до 0,94), что открывает возможность прогноза масштабов разлива за 15–20 сут до его максимума.

Исследование подтвердило роль Анадыро-Майнского разветвления как крупного естественного регулятора стока: в половодье здесь аккумулируется до 19,4 км³ воды, что приводит к значительному сглаживанию паводочной волны и формированию длительных (до полутора

месяцев) периодов затопления. Сужение долины и малые уклоны водной поверхности создают эффект подпора, усиливающий задержку воды.

Полученные результаты имеют важное практическое значение для организации судоходства на р. Анадырь. Несогласованность установленных гарантированных параметров судоходной трассы с современной морфологией русла подчёркивает необходимость пересчёта нормативных судоходных уровней и модернизации наблюдательной сети. Внедрение оперативного мониторинга на основе спутниковых данных позволит повысить безопасность навигации и оптимизировать транспортные решения. Дальнейшее развитие исследований связано с интеграцией данных ДЗЗ в гидродинамические модели для разработки научно-обоснованных рекомендаций по улучшению условий судоходства.

Литература

1. Захарова Е. А., Крыленко И. Н., Головлев П. П., Лусина А. А., Сазонов А. А., Семенова Н. К. Использование спутниковой альтиметрии в задачах гидродинамического моделирования уровня режима арктических рек // 5-е Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен: сб. докл. междунар. науч. конф. памяти Ю. Б. Виноградова. 2023. С. 187–190.
2. Семенова Н. К., Захарова Е. А., Крыленко И. Н., Сазонов А. А. Статистические методы и методы машинного обучения в расчётах уровней воды рек по данным спутниковых альтиметрических измерений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2024. Т. 21. № 1. С. 76–87. DOI: 10.21046/2070-7401-2024-21-1-76-87.
3. Чалов Р. С., Школьный Д. И. Гидрология и морфология узлов слияния рек с раздвоенным руслом // Водные ресурсы. 2025. Т. 52. № 2. С. 15–28. DOI: 10.31857/S0321059625020028.
4. Школьный Д. И., Головлев П. П., Сахаров А. И., Бахарева Е. И., Семаков В. А. Современные условия и проблемы судоходства на р. Анадырь // Речной транспорт (XXI век). 2025. № 1. С. 23–27.
5. Abdalla S., Kolahchi A. A., Ablain M. et al. Altimetry for the future: Building on 25 years of progress // Advances in Space Research. 2021. V. 68. Iss. 2. P. 319–363. <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.022>.
6. Albertini C., Gioia A., Iacobellis V., Manfreda S. Detection of surface water and floods with multispectral satellites // Remote Sensing. 2022. V. 14. Iss. 23. Article 6005. DOI: 10.3390/rs14236005.
7. Du Y., Zhang Y., Ling F. et al. Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band // Remote Sensing. 2016. V. 8. Iss. 4. Article 354. DOI: 10.3390/rs8040354.
8. Feyisa G. L., Meilby H., Fensholt R., Proud S. R. Automated Water extraction index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery // Remote Sensing of Environment. 2014. V. 140. P. 23–35. DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.029.
9. Gao B.-C. NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. 1996. V. 58. Iss. 3. P. 257–266. DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
10. Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone // Remote Sensing of Environment. 2017. V. 202. P. 18–27. DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
11. Hawker L., Uhe P., Paulo L. et al. A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed // Environmental Research Letters. 2022. V. 17. No. 2. Article 024016. DOI: 10.1088/1748-9326/ac4d4f.
12. Huang C., Chen Y., Zhang S., Wu J. Detecting, extracting, and monitoring surface water from space using optical sensors: A review // Reviews of Geophysics. 2018. V. 56. Iss. 2. P. 333–360. DOI: 10.1029/2018RG000598.
13. McFeeters S. K. The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features // Intern. J. Remote Sensing. 1996. V. 17. Iss. 7. P. 1425–1432. DOI: 10.1080/01431169608948714.
14. Xu H. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery // Intern. J. Remote Sensing. 2006. V. 27. Iss. 14. P. 3025–3033. DOI: 10.1080/01431160600589179.
15. Zhang L., Weng Q. Annual dynamics of impervious surface in the Pearl River Delta, China, from 1988 to 2013, using time series Landsat imagery // ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing. 2016. V. 113. P. 86–96. DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.01.003.

Remote sensing data in analysis of water regime of the Anadyr River under data scarce conditions

D. I. Shkolnyi¹, E. I. Bakhareva¹, P. P. Golovlev¹,
A. S. Tsyplenkov¹, E. A. Zakharova², M. A. Samokhin¹

¹ Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia

² Water Problems Institute RAS, Moscow 119333, Russia
E-mail: danila.hydro@yandex.ru

The Anadyr River is the major waterway of Chukotka and an important transport artery; however, its hydrological monitoring network is extremely sparse. Since 1997, no discharge observations have been conducted in the basin, and the most recent navigation maps date back to 1993. This lack of data complicates the assessment of the water regime and obstruct safe navigation, particularly within the Anadyr–Main anabranching system — a complex multi-channel structure that accumulates large floodwater volumes. In 2022, due to insufficient data a problem of estimation of navigable water levels was encountered during elaboration of modern navigation maps. Disagreement between estimates of depths and levels may lead to emergency situations. In this study, remote sensing data were combined with field observations collected in 2020–2024. Sentinel-2 imagery was used to map flooded areas and identify relationships between inundation extent and water levels measured at hydrological stations: during the flood season, the water surface area increases by a factor of 3.5–4.0, and the most reliable predictors of inundation are cumulative water levels over 15–21 days prior to the imagery date. Using the FABDEM (Forest And Buildings removed Copernicus DEM) digital elevation model and *in situ* depth measurements, the volume of water stored within the distributary system was estimated at up to 19.4 km³, which is comparable to half of the river's mean annual runoff. Satellite altimetry (Jason-3, Sentinel-3A) showed strong agreement with ground-based water level observations (coefficient of determination R^2 up to 0.96) and made it possible to reconstruct the along-river water profiles. The results demonstrate high informativeness and complementarity of remote sensing data for studying Arctic rivers having sparse monitoring networks. They provide as well a background for further hydrodynamic modeling of the Anadyr–Main system.

Keywords: Anadyr River, water regime, remote sensing, Sentinel-2, MNDWI, FABDEM, satellite altimetry, water surface slope

Accepted: 10.02.2026

DOI: 10.21046/2070-7401-2026-23-2-290-303

References

1. Zakharova E., Krylenko I., Golovlev P., Lisina A., Sazonov A., Semenova N., Use of satellite altimetry in hydrodynamic modelling of water level regime of the Arctic rivers, *Proc. of 5th Vinogradov Readings. Hydrology in the Era of Change: Intern. Scientific Conf. in Memory of Yu. B. Vinogradov*, 2023, pp. 187–190 (in Russian).
2. Semenova N. K., Zakharova E. A., Krylenko I. N., Sazonov A. A., Statistical and machine learning methods for river water level time series construction using satellite altimetry, *Cosmic Research*, 2024, V. 62, No. S1, pp. S81–S89, DOI: 10.1134/S001095252460121X.
3. Chalov R. S., Shkolnyi D. I., Hydrology and morphology of confluence nodes of rivers with a split channel, *Water Resources*, 2025, V. 52, Iss. 2, pp. 237–249, DOI: 10.1134/S0097807824701586.
4. Shkol'nyi D. I., Golovlev P. P., Sakharov A. I., Bakhareva E. I., Semakov V. A., Current conditions and navigation challenges on the Anadyr River, *River Transport (XXI Century)*, 2025, No. 1, pp. 23–27 (in Russian).
5. Abdalla S., Kolahchi A. A., Ablain M. et al., Altimetry for the future: Building on 25 years of progress, *Advances in Space Research*, 2021, V. 68, Iss. 2., pp. 319–363, <https://doi.org/10.1016/j.asr.2021.01.022>.
6. Albertini C., Gioia A., Iacobellis V., Manfreda S., Detection of Surface Water and Floods with Multispectral Satellites, *Remote Sensing*, 2022, V. 14, Iss. 23, Article 6005, DOI: 10.3390/rs14236005.
7. Du Y., Zhang Y., Ling F. et al., Water bodies' mapping from Sentinel-2 imagery with modified normalized difference water index at 10-m spatial resolution produced by sharpening the SWIR band, *Remote Sensing*, 2016, V. 8, Iss. 4, Article 354, DOI: 10.3390/rs8040354.

8. Feyisa G. L., Meilby H., Fensholt R., Proud S. R., Automated water extraction index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2014, V. 140, pp. 23–35, DOI: 10.1016/j.rse.2013.08.029.
9. Gao B.-C., NDWI—A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Remote Sensing of Environment*, 1996, V. 58, Iss. 3, pp. 257–266, DOI: 10.1016/S0034-4257(96)00067-3.
10. Gorelick N., Hancher M., Dixon M. et al., Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone, *Remote Sensing of Environment*, 2017, V. 202, pp. 18–27, DOI: 10.1016/j.rse.2017.06.031.
11. Hawker L., Uhe P., Paulo L. et al., A 30 m global map of elevation with forests and buildings removed, *Environmental Research Letters*, 2022, V. 17, No. 2, Article 024016, DOI: 10.1088/1748-9326/ac4d4f.
12. Huang C., Chen Y., Zhang S., Wu J., Detecting, extracting, and monitoring surface water from space using optical sensors: A review, *Reviews of Geophysics*, 2018, V. 56, Iss. 2, pp. 333–360. DOI: 10.1029/2018RG000598.
13. McFeeters S.K., The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features, *Intern. J. Remote Sensing*, 1996, V. 17, Iss. 7, pp. 1425–1432, DOI: 10.1080/01431169608948714.
14. Xu H., Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery, *Intern. J. Remote Sensing*, 2006, V. 27, Iss. 14, pp. 3025–3033, DOI: 10.1080/01431160600589179.
15. Zhang L., Weng Q., Annual dynamics of impervious surface in the Pearl River Delta, China, from 1988 to 2013, using time series Landsat imagery, *ISPRS J. Photogrammetry and Remote Sensing*, 2016, V. 113, pp. 86–96, DOI: 10.1016/j.isprsjprs.2016.01.003.