

ПРИМЕНЕНИЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ ПРИ ОЦЕНКЕ И ПРОГНОЗИРОВАНИИ ГИДРОЛОГИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК ВОДНЫХ ОБЪЕКТОВ СУШИ

Н. А. Решин

кафедра инженерной гидрологии Российского государственного гидрометеорологического университета, г. Санкт-Петербург, reshinn@yandex.ru

Е. В. Гайдукова

кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной гидрологии Российского государственного гидрометеорологического университета, г. Санкт-Петербург

Н. В. Викторова

кандидат технических наук, доцент кафедры инженерной гидрологии Российского государственного гидрометеорологического университета, г. Санкт-Петербург

И. О. Винокуров

кафедра инженерной гидрологии Российского государственного гидрометеорологического университета, г. Санкт-Петербург

М. С. Дрегваль

кафедра инженерной гидрологии Российского государственного гидрометеорологического университета, г. Санкт-Петербург

А. А. Батмазова

кафедра инженерной гидрологии Российского государственного гидрометеорологического университета, г. Санкт-Петербург

В исследовании отражено применение ГИС в работе над различными научными и прикладными задачами коллектива кафедры инженерной гидрологии ФГБОУ ВО «Российского государственного гидрометеорологического университета» (РГГМУ). Коллектив авторов применял ГИС в таких работах как определение границ зоны затопления для горных рек, оценка морфометрических характеристик озер, оценка и прогноз водного режима рек АЗРФ, оценка прозрачности озер по данным дистанционного зондирования Земли (ДДЗ). Рассматриваемые работы являются одними из последних трудов коллектива кафедры инженерной гидрологии и отражают широту применения ГИС в исследовательских тематиках, реализуемых на кафедре. ГИС зарекомендовали себя как удобный инструмент для дешифровки ДДЗ, построения тематических карт, работы с различными топографическими основами и интеграцией ГИС-инструментов в программные скрипты для автоматизированной обработки большого массива данных.

Ключевые слова: геоинформационные системы, гидрология суши, прогнозирование, уровни воды, модель рельефа, мультиспектральные спутниковые снимки, морфометрические характеристики озер, *ArcGIS*.

Скоро исполняется 30 лет как ГИС-технологии стали полнофункциональным и общедоступным продуктом на рынке цифровых технологий, благодаря чему темпы исследования и развития многих отраслей наук смогли ускориться в своем развитии и познания окружающего нас мира. Также не стоит забывать о роли ГИС-технологии при организации и управлении, ведь инструментарий данной технологии позволил быстро и качественно составлять проекты, в которых требовалось создавать географические объекты и придавать им куда большее количество признаков, чем позволяли бумажные носители в виде карт. Быстрое изменение географических объектов и их признаков, возможность работы с большим числом тематических слоев на одной территории, проведение анализа информации и визуализации его результатов, легкость передачи данных между пользователями – все это нашло применение в различных научных направлениях, в том числе в гидрологии суши. Гидрология суши – это научное направление «Гидрологии», науке, которая занимается изучением природных вод, явлений и процессов, в них протекающих, а также определяет распространение воды на земном шаре. Коллектив кафедры инженерной гидрологии РГГМУ уже более 10 лет применяет в своей деятельности ГИС-технологии как для решения научных, так и прикладных задач. В работе представлены одни из последних результатов трудов сотрудников кафедры, а обширность тем только подчеркивает степень вовлеченности ГИС-технологий при решении поставленных задач.

Особенности определения границ зоны затопления для горных рек (на примере р. Самур). В период прохождения высоких вод на реках и озера происходит резкое повышение уровня воды с последующим выходом ее на прилегающую к водному объекту территорию. Если такое происходит в черте населенного пункта или иной территории, на которой протекает хозяйственная деятельность человека, то такое событие называется наводнением. Оно может вызвать как экономические потери, так и человеческие. Для уменьшения ущерба от подобных явлений производится мониторинг за уровнем воды на водных объектах. На основании данных мониторинга уровня воды производится расчет зон затопления для хозяйственно важных и потенциальных для освоения территорий для оценки возможных рисков от прохождения наводнения. При определении границ зон затопления и/или подтопления основными руководящими документами являются Водный Кодекс РФ ст. 67 и ст. 67.1 и Градостроительный кодекс РФ ст.1. В 2014 году была развернута программа по оценке зон затопления, добавившая к основным нормативным документам Постановления Правительства РФ от 18.04.2014 г. № 360 «Об определении границ зон затопления, подтопления». В силу актуальности данного вопроса, не так давно в этот документ были внесены изменения Постановлением Правительства РФ от 07 сентября 2019 г. № 1171 [1].

В свою очередь есть ряд особенностей для расчета зон затопления для различных типов местности, особенно стоит отметить горные районы, что и стало причиной разработки и апробации методики определения границ зон затопления

для горных рек на основе метода соответственных уровней. Реки в горах – бурные, стремительные. Подъем уровня воды в таких реках во время паводков может превышать 5–6 м и иметь достаточно большую площадь разлива. И все это осложняется тем, что в данных районах сеть мониторинга достаточно разреженная в силу особенностей местности, поэтому значения уровня воды можно получить из полевых измерений и обследований, из пространственного анализа и картографирования средствами ГИС. Из-за отсутствия полевых исследований в данной работе использовались методы гидрологических обобщений и гидрологических расчетов [2], а также прогнозный метод соответственных уровней воды, позволяющий определить границы зон затопления с некоторой заблаговременностью [3]. Метод соответственных уровней, сводится к установлению эмпирических связей между фазово-однородными уровнями воды, наблюдающимися в верхних и нижних створах.

Объектом для апробации рассматриваемых подходов стала река Самур. Это трансграничный водный объект, берущий свое начало в Дагестане. Длина реки 213 км, площадь водосбора 4990 км², средний уклон 13,7 ‰, средняя высота водосбора 1970 м. Исследования выполнялись в среднем течении реки с замыкающим створом в с. Усухчай, для расчетов также использовались два притока – реки Ахтычай и Усухчай. В ходе работы были построены границы зон затопления для 1 %, 5 %, 10 %, 25 % и 50 % обеспеченных уровней воды. В качестве топографической основы была выбрана топографическая карта масштаба 1:25000, что вполне соответствует предъявляемым требованиям для проведения подобных изысканий. Построение цифровой модели рельефа основывалось на нанесении горизонталей, реперных отметок, линии русла реки и берегов. Для построения границ зон затоплений финальные абсолютные отметки высот были получены путем суммирования уровня воды заданной обеспеченности с нулем графика поста.

На рисунке 1 приведены предполагаемые границы затопления при уровне воды обеспеченностью от 1 % до 50 %. При наличии имеющихся данных и на основе проведенных расчетов, граница зон затоплений определена только для участка, ниже по течению реки, чем расчетный створ р. Самур – с. Усухчай. Линии обеспеченных уровней проходят почти в притык и увидеть разницу можно только при достаточном приближении, что вполне ожидаемо для горного района, в силу того, что расчлененный рельеф не дает подниматься уровню воды сильно выше и нет такого возможного видимого результата, как на равнинных реках. Предположительно, правый берег затопливается сильнее, чем левый и может даже доходить до городского поселения ниже по течению Новое Каракюре.

Подводя итоги можно резюмировать следующее:

– Серия поверочных прогнозов по методу соответственных уровней подтвердила сложность работы с горными реками по сравнению с равнинными. У

горных рек множество особенностей, и учесть все довольно трудно. Одним из главных факторов выступает рельеф, а именно – его расчлененность.

– Недоучет специфики формирования стока в горах в сочетании с недостаточным количеством гидрометеорологических постов и станций снижают степень достоверности результатов расчетов стоковых характеристик горных рек.

– Определение границ зон затопления является кропотливой, многоуровневой задачей, в большинстве случаев запрашивающей не только объемную, качественную и доступную гидрометеорологическую и картографическую информацию, но и индивидуальный подход к рекам и наличие надежного программного обеспечения.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ (№20-55-05006\20).

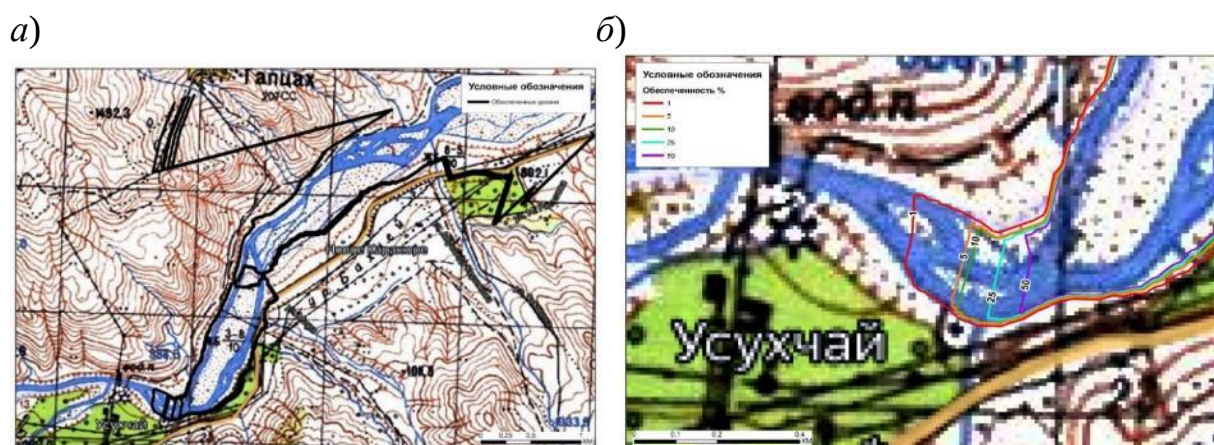


Рис. 1. Карта-схема ориентировочных границ зон затоплений при уровнях воды от 1 до 50 % обеспеченности для створа р. Самур – с. Уссухчай (а) и увеличенный фрагмент (б)

Применение ДЗЗ для оценки морфометрических характеристик озер.

Для хозяйственного использования таких водных объектов суши, как озера, необходимо знать их морфометрические характеристики – показатели формы, а именно форму котловины, размер водной поверхности и площади водосбора. Основным показателем является площадь зеркала озера, эта характеристика отражает плановые размеры водоема и используется для различных расчетов, например, для определения колебания уровня воды и изменение ее запасов в водоеме. Существующие зависимости между уровнем воды и площадью зеркала, их же еще называют батиграфическими кривыми, позволяют оценить площадь зеркала для любого уровня:

$$H = f(F_0), \quad (1)$$

где H – уровень воды в водоеме, м; F_0 – площадь зеркала, км².

Такие кривые имеют большое практическое значение и используются при различного рода расчетах эффективности водохозяйственных мероприятий, связанных с изменением уровня воды в озере [4, 5]. Колебание площади зеркала водоема можно наблюдать с помощью спутниковых снимков за различные периоды времени, а одним из самой доступной для широкого пользования и проведения научной деятельности является база данных мультиспектральных спутниковых снимков миссии *Landsat*. В исследовании используются снимки со спутника *Landsat 8* за период с 2013 по 2019 годы. Обработка ДЗЗ производится в программном комплексе *ArcGIS 10.5*.

Для оценки площади зеркала по спутниковому снимку в *ArcGIS* производится комбинация каналов номер 7, 6 и 4 с целью получения растра, на котором вода и суша будут иметь четкую границу между собой. После чего, средствами *ArcGIS* создается обучающая выборка на основе деления растра на основные классы объектов (водные объекты, суша, растительность, облака) с последующей автоматизированной классификацией растра по методу наибольшего подобия. Цель этой процедуры – создание маски водных объектов с минимальным использованием ручного труда пользователя. На следующем этапе производится расчет значения площади зеркала и фиксация его на конкретную дату.

После обработки всех снимков по водному объекту строится график зависимости $H = f(F_0)$, уровень воды берется по данным наблюдения за уровнем воды в водоеме.

В исследовании приняли участие 9 озер СЗ РФ – оз. Пелено, оз. Коробож, оз. Шугозеро, оз. Тулмозеро, оз. Лексозеро, оз. Лендерское, оз. Сяберо, оз. Суоярви, оз. Ведлозеро. В общей сложности был обработан 261 снимок для определения площади зеркала представленных водоемов. Пример графика зависимости $H = f(F_0)$ для оз. Ведлозер представлен на рисунке 2.

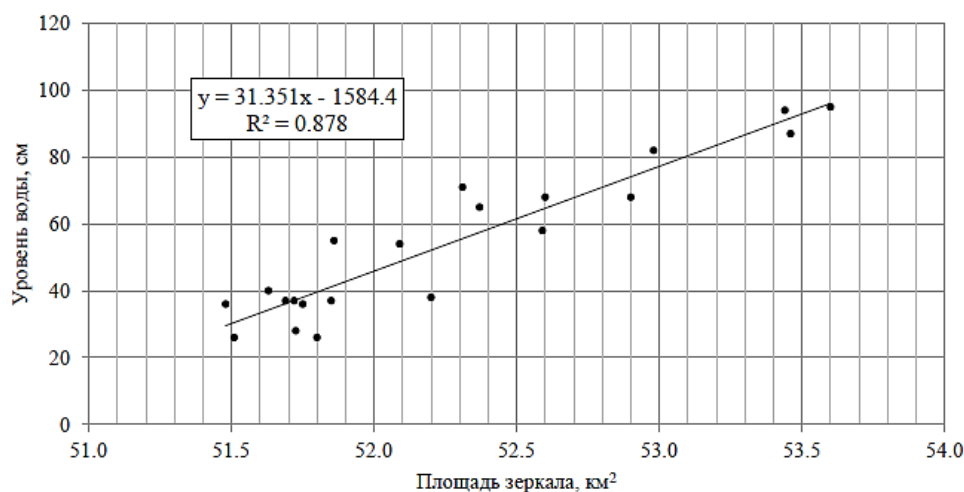


Рис. 2. График зависимости уровня воды от площади зеркала $H = f(F_0)$, оз. Ведлозеро

После получения уравнений линейной регрессии между уровнем воды и площадью зеркала для каждого озера производилась оценка надежности этих уравнений по 4 критериям надежности в соответствии с нормативной документацией [2]. Озера Шугозеро, Коробожа и Лексозеро не прошли проверку надежности. Для остальных озер все требования выполняются, что означает надежность уравнений регрессии для озер Пелено, Тулмозеро, Лендерское, Сяберо, Суоярви и Ведлозеро, а, следовательно, их можно рекомендовать для проведения практических расчетов.

После отсеивания ненадежных объектов, оставшиеся уравнения регрессии были опробованы на независимом материале путем сравнения измеренных на уровнемерных постах значений и определенных по зависимостям. Средняя относительная погрешность определения уровня воды не превышает 10 %, а средняя ошибка составила 5 %. Следовательно, можно сделать вывод о том, что данные уравнения регрессии можно рекомендовать к практическим расчетам, и точность расчета является приемлемой.

Резюмируя вышеизложенное, можно сказать, что данная методика годится для определения уровней при отсутствии постоянных наблюдений при закрытии гидрологического поста. Для увеличения точности расчетов можно пользоваться спутниковыми данными с более высоким разрешением.

Оценка и прогноз водного режима рек ЯНАО. Согласно исследованиям, которые проводятся последние 150 лет, на нашей планете наблюдается потепление климата. Арктика – это регион, который входит в число самых уязвимых регионов к изменению климата [6]. Примерно 65 % площади Российской Федерации – это территории с многолетней мерзлотой. Повышение температуры и таяние мерзлоты увеличивает риск просадки и обвалов грунтов, повреждения важных объектов инфраструктуры (трубопроводы, автомобильные дороги и пр.), заболачивания территорий [7]. В последние годы внимание уделяется развитию северных регионов России. В их число перспективных регионов входит и полуостров Ямал, на территории которого находятся многочисленные запасы углеводородов. На сегодняшний день более 91 % всего природного газа России, или 23,7 % мировой газодобычи, приходится на Ямало-Ненецкий автономный округ (ЯНАО) [8].

Целью исследования является разработка и апробация методики сценарной оценки водного режима рек ЯНАО с учетом возможного таяния многолетней мерзлоты. В исследовании приняли участие водосборы с размером площади от 1500 до 50000 км², которые находятся в зоне многолетней мерзлоты и имеют действующую метеостанцию на своей территории. Исследование проводилось по годовым данным за многолетний период – среднегодовые расходы воды рек, сумма осадков, температура воздуха, температура грунтов на различных глубинах и др.

Для исследования были выбраны 3 гидрологических поста на р. Пяку-Пур – п. Тарко-Сале, р. Ляпин – п. Саранпауль и р. Северная Сосьва – п. Няксимволь. На указанных постах расположены соответствующие им три метеорологические станции Тарко-Сале, Саранпауль, Няксимволь (рисунок 3).

По метеорологическим станциям были выбраны данные о суточных температурах грунта на различных глубинах (20 см, 60 см, 80 см, 120 см, 180 см, 240 см, 360 см), среднегодовых температурах воздуха и годовых сумм осадков, а для гидрологических постов использовались данные о среднегодовых расходах воды. После чего для рядов расходов воды производится расчет стандартных статистических характеристик и оценка однородности рядов по критериям Фишера и Стьюдента. Проверка однородности рядов показала, что все ряды неоднородны по критерию Фишера и однородны по критерию Стьюдента.

Вследствие изменения климата исходные ряды данных разделялись на стационарный период (с момента наблюдения и до 1980 год) и нестационарный период (с 1981 по 2018 год). Наибольший интерес представляет нестационарный период, поскольку оценка водного режима по зависимостям стационарного периода больше не отвечает требованиям надежности получаемых прогнозов на сегодняшний день.

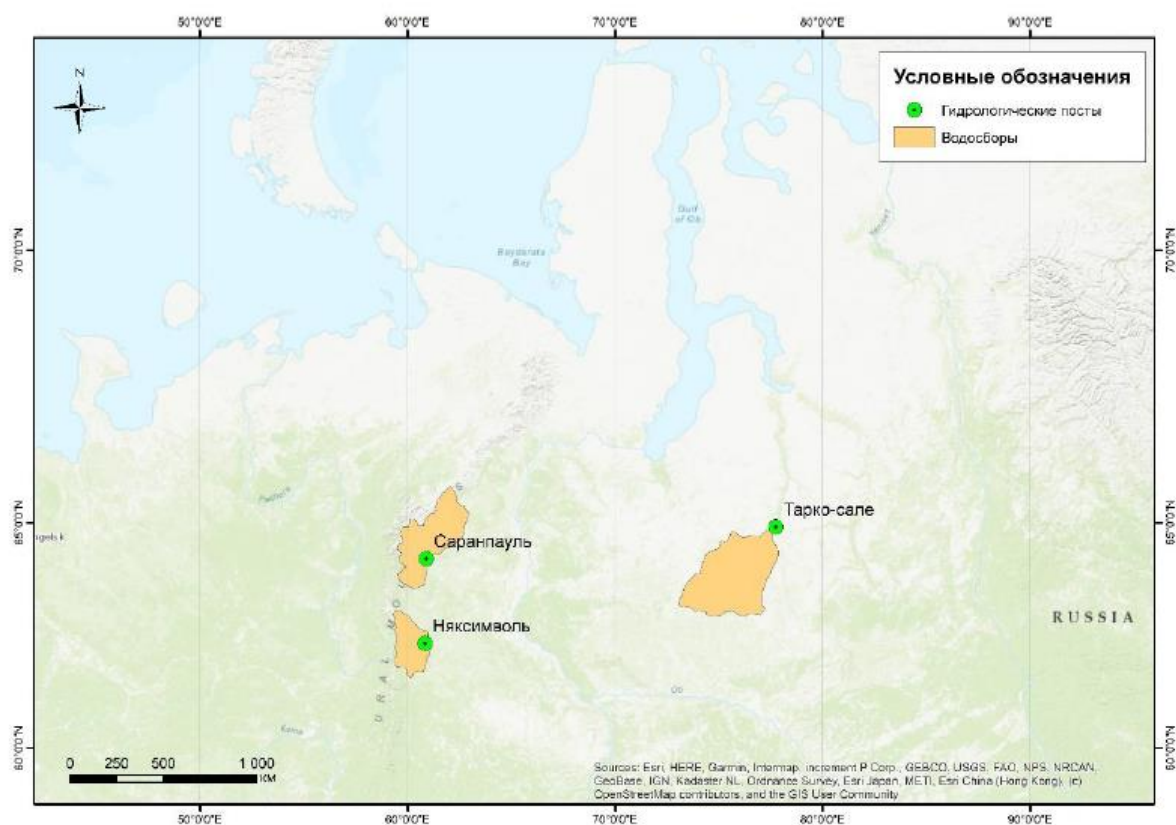


Рис. 3. Карта расположения гидрометеорологических станций

Методика расчета заключается в использовании климатических характеристик при прогнозировании характеристик стока с учетом водоотдачи влаги из оттаявшего многолетнемерзлого грунта.

Одной из характеристик является величина водоотдачи из грунта. Для расчета этой характеристики используется температура почвы, тип почвогрунтов и влажность почвы. В связи с отсутствием систематических наблюдений за почвенной влагой, оценка и учет этой характеристики значительно затруднены. Измерения, как правило, производятся при проведении изысканий. Исходя из этого было принято решение обратиться к данным полученным с ДЗЗ. Подходящим источником данных стал проект *SMAP (Soil Moisture Active Passive)*, запущенный NASA в январе 2015 г. На борту спутника *SMAP* установлен пассивный микроволновой радиометр, работающий в *L*-диапазоне (1.400–1.427 ГГц) и предназначенный для измерения поверхностной влажности почвы и состояния замораживания–оттаивания с пространственным разрешением около 40 км [9].

Диапазон охвата составляет от 180°W до 180°E, а также приблизительно от 85,044°N до 85,044°S. Охват предназначен для глобальной поверхности суши, исключая внутренние воды. Собственное пространственное разрешение радиометра *SMAP* составляет приблизительно 36 км. Данные считываются, затем ассимилируются в модель поверхности суши, которая привязана к сетке с использованием проекции 9 км *global EASE-Grid 2.0*. Оценки влажности почвы на поверхности и в корневой зоне уровня 4 проверяются с точностью до среднеквадратичной ошибки (*RMSE*) требование 0,04 м³/м³ после устранения долгосрочного среднего смещения.

Для определения и сравнения влажности почвы были выбраны дата перехода температуры воздуха через 0 в отрицательные значения (0–), дата перехода температуры воздуха через 0 в положительные значения (0+), дата начала половодья и дата в середине летней межени. Для этого по данным постов р. Пяку-Пур – п. Тарко-Сале и р. Северная Сосьва – п. Няксимволь были построены хронологические графики хода температуры воздуха и гидрографы внутригодового распределения стока, по которым определены необходимые даты. Пример таблицы представлен для р. Пяку-Пур – п. Тарко-Сале в таблице 1.

Для выбранных дат на сайте Национального центра данных по снегу и льду (*NSIDC*) были скачаны трехчасовые данные по влажности почвы для времени 00:00 и 03:00 по всей поверхности планеты с разрешением 9 км в формате *NetCDF*. При помощи программного комплекса *ArcGIS* данные были распакованы в растровом виде. Для оценки влажности почвы на водосборе исследуемых рек по цифровой модели рельефа арктической зоны *ArcticDEM* были определены границы водосборов. Так значения влажности почвы для р. Пяку-Пур – п. Тарко-Сале на дату перехода через 0– за 12.10.2016 составило 0,522 м³/м³ как для 00:00, так и для 03:00. Анализ всех значений влажности показал, что нет значительной разности между значениями, взятыми для времени 00:00 и 03:00 для различных

дат и сезонов. Поэтому в дальнейшем используются осредненные значения влажности за оба момента времени.

Таблица 1

Ключевые даты для определения влажности почвы для р. Пяку-Пур – п. Тарко-Сале

	2016–2017 гг.	2017–2018 гг.	2018–2019 гг.
Дата перехода через 0–	11.10.2016	23.10.2017	29.10.2018
Дата перехода через 0+	26.05.2017	27.05.2018	24.05.2019
Дата окончания половодья	02.08.2017	01.08.2018	
Дата в межень до паводка	01.10.2017	01.10.2018	

Количество воды с оттаявших грунтов необходимо учитывать при составлении прогноза, т.к. вода с оттаявших грунтов будет стекать по водосбору и за счет этого увеличится сток. Для учета количества водоотдачи с грунта необходимо скорректировать коэффициент стока, который будет увеличиваться за счет такой добавочной воды. Для водосбора реки Пяку-Пур – п. Тарко-Сале с учетом стока оттаявших грунтов ($h=52$ мм) при прогнозе с маловодного периода на многоводный коэффициент стока увеличится на 15 %, при прогнозе с многоводного периода на маловодный увеличение коэффициента стока составит 17 %. После проведения корректировки данных по стоку производится сравнение погрешностей математического ожидания и коэффициента вариация до учета оттаявшего слоя и после. Сравнение результатов показало, что методика лучше работает для прогноза на период нестационарного режима, т.е. период потепления климата.

В результате были выведены расчетные прогностические уравнения, учитывающие оттаивание многолетней мерзлоты вследствие повышения температуры в АЗРФ. Наиболее точные уравнения можно рекомендовать для прогнозирования стока воды на территории ЯНАО, а методику сценарной оценки водного режима рек применять для всей территории АЗРФ, при условии, что водосборная территория отвечает условиям отбора.

Методика оценки прозрачности воды Ладожского озера по данным дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Одним из важных показателей качества воды является ее прозрачность. Мониторинг за данной характеристикой производится либо с помощью диска Секки, либо специальным зондом, включающим в себя комплекс датчиков. Однако по-прежнему для измерения прозрачности воды приходится организовывать экспедиции на судах и, в зависимости от размера озера, тратить на замеры от нескольких часов до нескольких дней. Но с

развитием технологий зондирования Земли из космоса и дешифровкой полученных данных в ГИС появилась возможность определять прозрачность воды более простым и экономичным способом.

Целью исследования было выведение функциональной зависимости прозрачности Ладожского озера по данным мультиспектральных спутниковых снимков. Для исследования было выбрано Ладожское озеро по ряду причин. Основной можно считать важность данного водного объекта в водоснабжении ряда городов, в первую очередь Санкт-Петербурга. Также на Ладожском озере уже долгие годы ведется мониторинг качественных показателей воды научными сотрудниками Лаборатории географии и гидрологии Института озероведения РАН. Выражаем благодарность сотрудникам лаборатории и ее заведующему, доктору географических наук, профессору Наumenko М.А.

Ладожское озеро крупнейшее европейское озеро (площадь 18135 км²), имеющее неоднородную морфометрию котловины, сформированную в результате ледниково-тектонической деятельности. В свете этого его характеристики могут значительно отличаться в различных частях озера. Так глубоководная северная часть обычно более прозрачна, чем мелководная северная, из-за того, что вода в глубоководной части озера прогревается меньше, там менее интенсивно развиваются микроводоросли, которые влияют на качество воды. На прозрачность озера также влияет количество рек и объем наносов, с ними поступающих. Крупные реки как Волхов, Свирь и Сясь вносят свой вклад в состояние прозрачности воды южной части озера.

Для оценки прозрачности воды используются данные с мультиспектральных спутниковых снимков со спутника *Landsat 8* и *Sentinel-2*, а обработка данных проводилась при помощи программного комплекса *ArcGIS*. Данные мониторинга за прозрачностью представлены за периоды с 4 июля по 2 августа 2017 года, с 15 июля по 23 июля 2019 года и с 3 по 7 июля 2021 года. На период проведения экспедиций подбирались спутниковые снимки с допустимым качеством съемки – основным критерием являлось отсутствие или минимальное количество облаков над акваторией озера.

Изначально исследование проводилось по материалам 2017 и 2019 годов, а в 2022 году полученные по этим годам функциональные зависимости проверялись на материалах 2021 года и дополнялись ими, с целью усовершенствования функциональных зависимостей. Поэтому сначала будет рассмотрен процесс получения зависимостей для 2017 и 2019 годов [10]. Расположение станций мониторинга во время экспедиций можно увидеть на рисунке 4.

На основании анализа исследований в области дистанционного мониторинга прозрачности проводимых в России и за рубежом, для построения функциональных зависимостей были выбраны каналы, характеризующие отражение в синем, зеленом и красных частях спектра, для обоих спутников номера каналов,

соответствующих данным частям спектра, являются 2, 3 и 4 соответственно. Для каждой станции были извлечены значения с выбранных каналов.

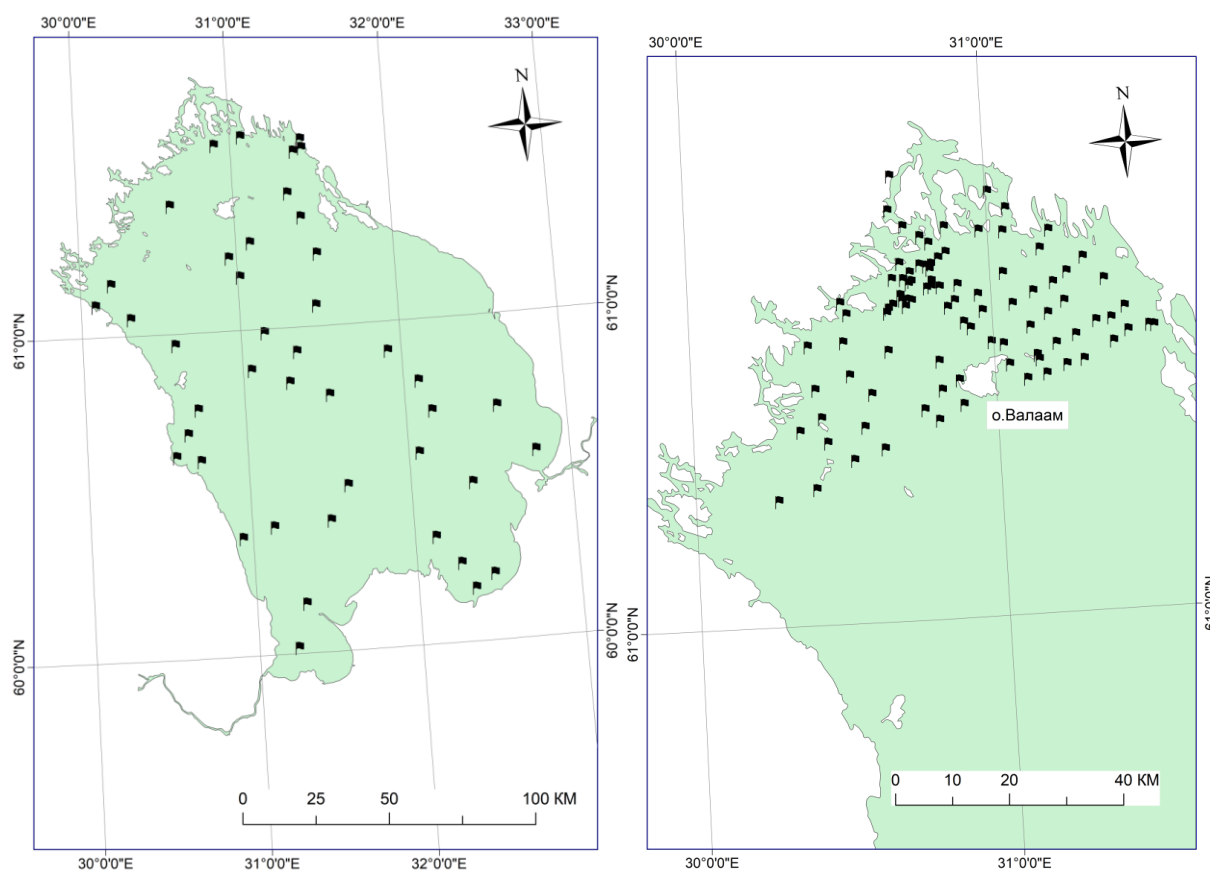


Рис. 4. Экспедиционные станции мониторинга Ладожского озера за 2017 год (слева) и 2019 год (справа)

Общее число станций за два периода составляет 136, однако весь ряд был разделен на два фрагмента. 2/3 значений были использованы для определения функциональных зависимостей, а 1/3 используется для апробации полученных зависимостей.

Далее начинается перебор комбинаций каналов и их соотношений для нахождения оптимальной зависимости по методу множественной корреляции. Поскольку диапазон изменения прозрачности мал, было принято решение прологарифмировать значения прозрачности по натуральному логарифму и обозначить его $\ln T$, где T – прозрачность в метрах. Наиболее надежные результаты показали два уравнения, представленные в таблице 2.

Таблица 2

Формулы для восстановления прозрачности по спутникам Landsat 8 и Sentinel-2

Спутник	Формула	Относительная погрешность, %			Абсолютная погрешность, м
		средняя	макс	мин	средняя
<i>Landsat 8</i>	$\ln T = (-1,7 + (-0,00256 * (4к) + (0,0026 * (3к)))$	12,6	70,9	0,01	0,31
<i>Sentinel-2</i>	$\ln T = (-24,2 + (16,0 * (3к/4к)) + (16,6 * (2к/3к)) + (-10,5 * (2к/4к)))$	10,6	70,8	0,02	0,27

Оценку значений прозрачности, восстановленных по независимому материалу, можно увидеть в таблице 3

Таблица 3

Оценка абсолютной погрешности восстановления прозрачности по контрольным данным

Спутник	Абсолютная погрешность, м		
	средняя	максимальная	минимальная
<i>Landsat 8</i>	0,47	1,08	0,006
<i>Sentinel-2</i>	0,38	0,92	0,02

Анализ зависимости относительных погрешностей от прозрачности показал, что большинство ошибок находится в интервале от 0 до 10 % при прозрачности от 2 до 3 метров, а наибольшие погрешности при восстановлении значений прозрачности (более 40 %) наблюдаются при прозрачности 1,5 м. Если учитывать знак погрешности, то можно сделать вывод о том, что завышение и занижение восстановленных значений над измеренными встречается в равной степени.

По функциональным зависимостям были построены карты распределения прозрачности по акватории озера, на рисунке 5 представлен пример для дат экспедиции в 2017 году по спутнику *Landsat 8*.

Полученные зависимости за 2017 и 2019 года проверялись на экспедиционных материалах 2021 года. Общее число станций за эту экспедицию составило 49. В этот раз получить снимки спутника *Sentinel-2* не оказалось возможным, поэтому исследование продолжилось со снимками спутника *Landsat 8*.

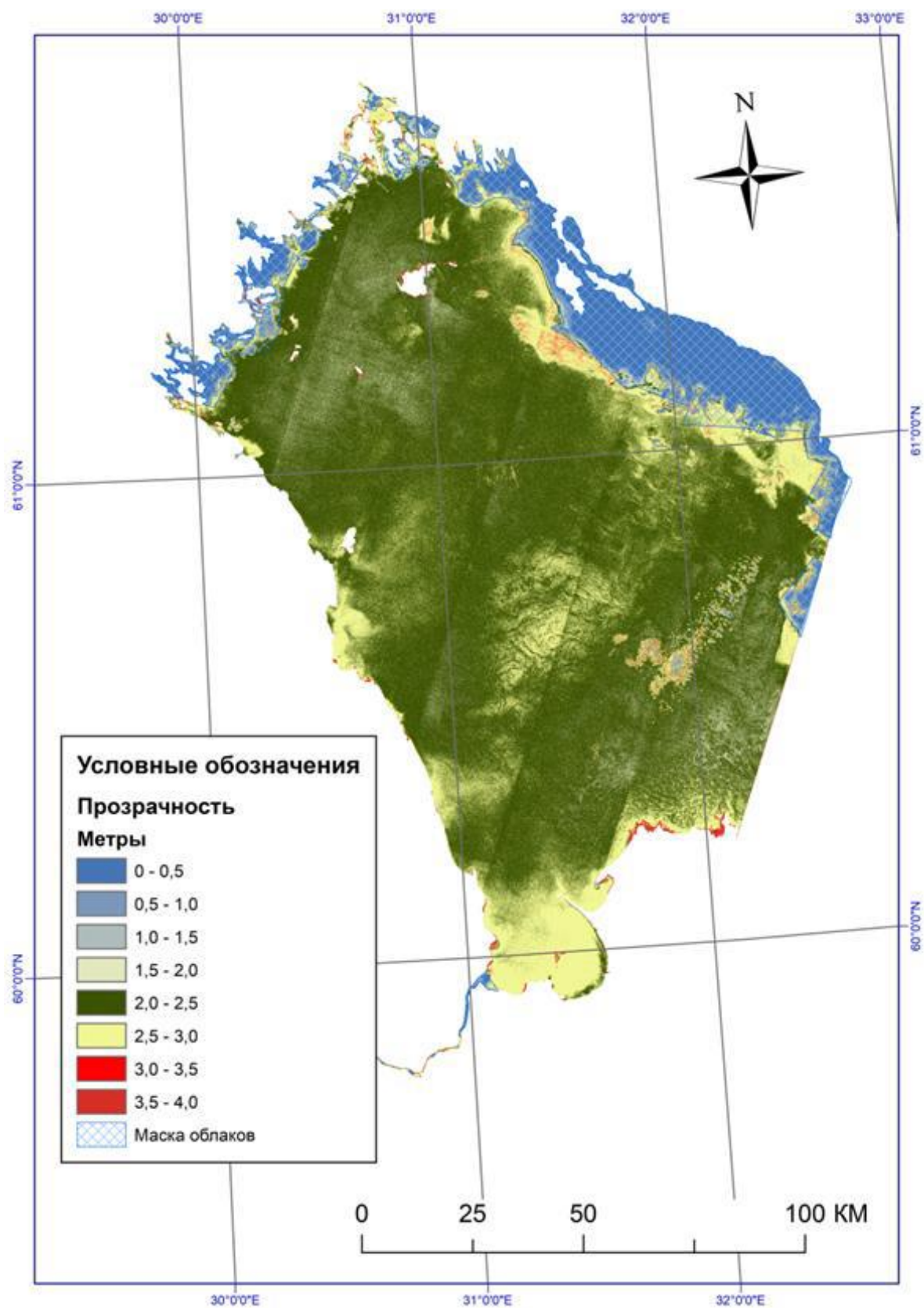


Рис. 5. Прозрачность Ладожского озера, Landsat 8, 2017 г.

Результат восстановления прозрачности по зависимости $\ln T = (-1,7 + (-0,00256 * (4k) + (0,0026 * (3k)))$ представлен в таблице 4, где также производится сравнение с ранее полученным результатом для того же спутника.

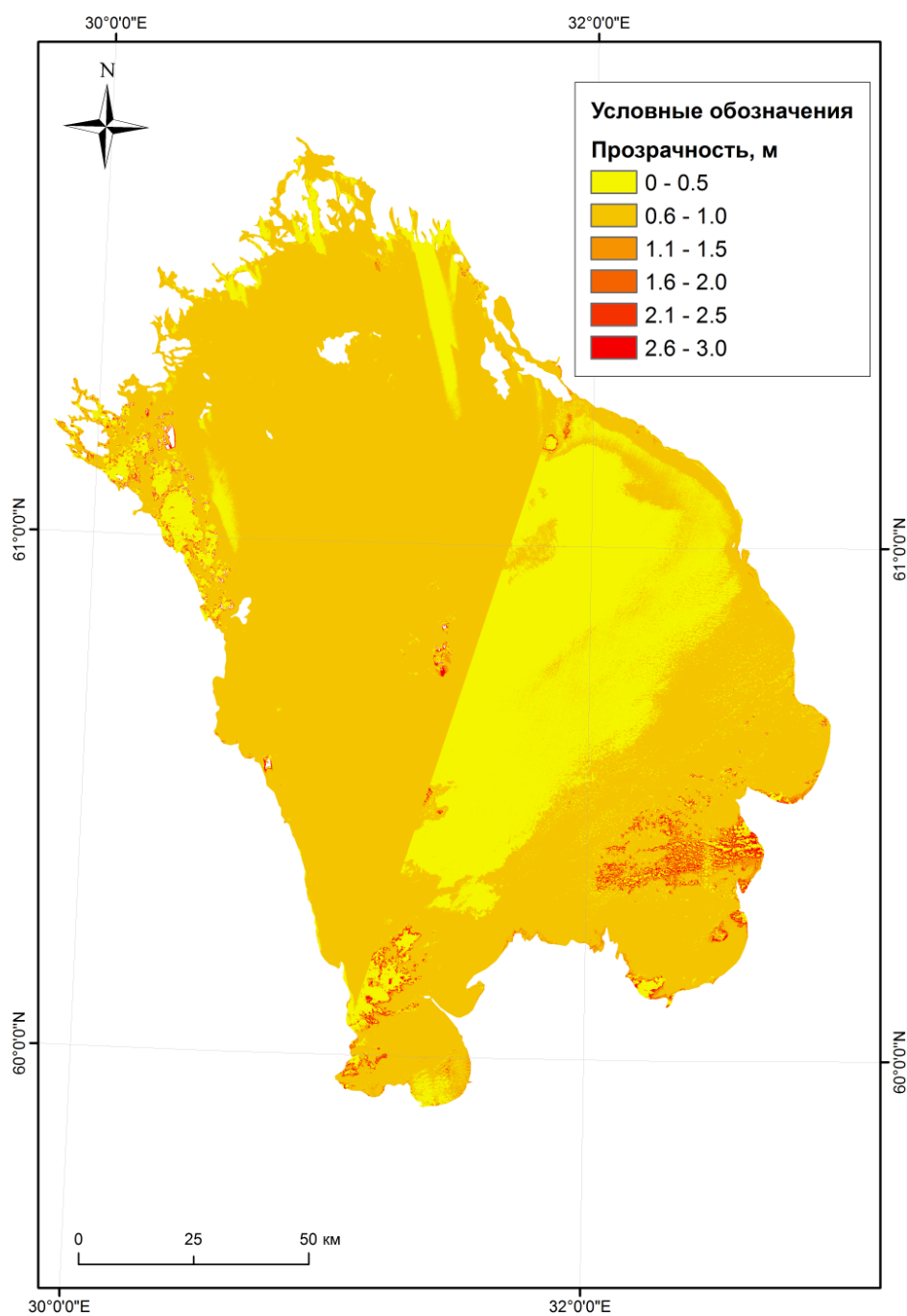


Рис. 6. Прозрачность Ладожского озера, Landsat 8, 2021 г.

Таблица 4

Сравнение погрешностей полученных результатов

Год	Относительная погрешность, %			Абсолютная погрешность, м
	средняя	максимальная	минимальная	средняя
2017 и 2019	12,6	70,9	0,01	0,31
2021	80,9	95,2	34,3	2,04

Как видно из таблицы 4 качество восстановления прозрачности по новому материалу ухудшилось многократно. В целом это закономерный результат, т.к. использовать для восстановления прозрачности данные только двух лет недостаточно.

Следующим шагом было принято решение откорректировать ранее полученную функциональную зависимость с учетом новых данных измерений. По аналогии совместный ряд значений прозрачности был разделен на две части – 141 значение используются в выведении функциональной зависимости, а 42 применяются в апробации результата.

Была выведена оптимальная зависимость $\ln T = (-200.3 + (-0.0033 \cdot (4к)) + 0,003 \cdot (3к) + 117 \cdot (4к/3к) + 87 \cdot (3к/4к) + 0,0002 \cdot (2к) - 3,58 \cdot (2к/3к))$.

Значение средней относительной ошибки после восстановления значений прозрачности равно 13,4 %, максимальной – 70,54 %, минимальной – 0,03 %. Значение абсолютной погрешности не превышает 0,34 м.

Апробация на независимом материале показала следующий результат – значение средней относительной ошибки после восстановления значений прозрачности равно 18,4 %, максимальной – 63,7 %, минимальной – 0,39 %, а значение абсолютной погрешности не превышает 0,43 м. По полученной зависимости была построена карта распределения прозрачности воды по акватории Ладожского озера, представленная на рисунке 6.

В результате исследований была разработана функциональная зависимость определения прозрачности воды Ладожского озера по спутниковым снимкам. Однако, при построении пространственного распределения прозрачности по полученной формуле для всей акватории, оказалось, что результаты слабо связаны с реальными значениями мониторинга озера.

В заключении необходимо отметить многообразие тем, в которых на различных этапах исследования были задействованы ГИС-технологии. Коллектив кафедры инженерной гидрологии и дальше будет пользоваться столь незаменимой в современном мире технологией для выполнения научных исследований и прикладных проектов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Варенцова Н.А., Никифоров Д.А., Гранич П.С. Нормативно-правовые основы проектов определения границ зон затопления и существующие проблемы // Перспективы развития инженерных изысканий в строительстве в Российской Федерации, 2018. – С. 194–196.
2. СП 33-101-2003 «Определение основных расчетных гидрологических характеристик». Госстрой России, ФГУП ЦПП, 2004. 73 с.
3. Гайдукова Е.В., Мякишева Н.В., Маргарян В.Г., Винокуров И.О., Решин Н.А. Особенности прогнозирования стока горных рек (на примере водосборов Дагестана и Армении) // Морские исследования и образование. Тверь, 2021. С. 359–362.
4. Догановский, А. М. Гидрология суши/А. М. Догановский. — Санкт-Петербург: РГГМУ, 2012. 524 с.
5. Догановский А.М., Орлов В.Г. Сборник практических задач по определению основных характеристик водных объектов суши (практикум по гидрологии). – Санкт-Петербург: РГГМУ, 2011. – 315 с.
6. Катцов В.М. Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // Арктика: экология и экономика, №2 (6), 2012.
7. Воздействие изменения климата на российскую Арктику: анализ и пути решения проблемы. WWF России. – М., 2008. – 28 с.
8. Ямал – край, где начинается родина [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://federalbook.ru/files/FS/Soderjanie/FS-19/V/Neelov.pdf>
9. Расчет испаряемости и суммарного испарения с водосборов северо-запада России. – Труды КНИЦ РАН, № 9, 2016. – С. 95–101.
10. Баранова А.Р., Кагукина С.А., Решин Н.А., Тимофеева Л.А. Оценка прозрачности ладожского озера по снимкам спутника Landsat-8 // В сборнике: Морские исследования и образование (MARESEDU-2019). Труды VIII Международной научно-практической конференции. 2020. – С. 233–236.