



УДК 556.555.2+551.515.1(470.2)
<https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.53.20>

Применение иерархического подхода для моделирования уровенного режима малых и средних озер северо-запада России

А. А. Батмазова*

*Российский государственный гидрометеорологический университет, г. Санкт-Петербург,
Россия*

Аннотация. Рассматривается принцип разработки моделей формирования уровня режима, основанный на иерархическом подходе, в условиях недостатка исходной гидрометеорологической информации. Исследуемыми объектами являются средние и малые озера Северо-Западного региона России, относящиеся к бассейнам Балтийского, Баренцева и Белого морей. Используется подход, основанный на методах множественной линейной регрессии и воднобалансовой теории. Приводится обоснование недостаточной обеспеченности исследуемой территории гидрометеорологическими данными. С помощью методики, включающей применение авторской программы и экспертного подхода, предлагаются варианты решения вопроса о дефиците исходной информации. Результатом является список репрезентативных метеостанций, а также физически и статистически обоснованные предикторы регрессионных моделей, позволяющих прогнозировать уровень режим озер с учетом альтернативных гидрометеорологических характеристик с оптимальным временем реакции озерных систем на изменение окружающей среды. Приводится анализ эффективности полученных моделей и выдвигаются предположения о некоторых особенностях, связанных с неоднозначностью оценок эффективности. Иерархическое развитие моделей заключается в переходе от локальных факторов формирования уровня режима озер к макромасштабным, что позволит конкретизировать период заблаговременности прогнозов. С этой целью анализируется связь показателей циклонической деятельности над акваториями Балтийского, Баренцева и Белого морей с уровнем режим озер исследуемой территории. В результате исследования получены модели, позволяющие не только моделировать, но и удлинять и восстанавливать ряды среднесуточных и среднемесячных уровней воды озер. Предложенная структура моделей адаптивна к изменяющимся внешним воздействиям в связи с тем, что формирование уровня режима рассматривается с точки зрения разномасштабных процессов.

Ключевые слова: озера, уровень режим, гидрометеорологическая изученность, физико-статистический воднобалансовый подход, циклоническая деятельность, атмосферное давление.

Благодарности. Работа выполнена в рамках госзадания Минобрнауки РФ № FSZU-2023-0002.

Для цитирования: Батмазова А. А. Применение иерархического подхода для моделирования уровня режима малых и средних озер северо-запада России // Известия Иркутского государственного университета. Серия Науки о Земле. 2025. Т. 53. С. 20–38. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.53.20>

Application of a Hierarchical Approach to Modeling the Water Level Regime of Small and Medium-Sized Lakes in North-West Russia

A. A. Batmazova*

Russian State Hydrometeorological University, Saint Petersburg, Russian Federation

Abstract. The article presents a set of hierarchical models that allow simulating, extending and restoring series of average daily and average monthly water levels of small and medium-sized lakes in the North-West region of Russia. The objects under study are lakes of the Baltic, White and Barents Sea basins. One of the key problems is the lack of initial hydrometeorological information in the region under consideration. This issue is resolved using the author's program and expert analysis, which allow selecting representative meteorological stations. The article searches for alternative predictors of potential prognostic regression models. This search is based on multivariate statistics methods and the water balance approach. As a result of combining both approaches, predictors were identified that allow replacing insufficiently accurate data on atmospheric precipitation with such characteristics as: relative air humidity, water vapor saturation deficit. The models obtained in the article allow simulating the level regime of lakes with an optimal lead time of 3 days for models constructed using daily discrete data, and 1 month for models constructed using monthly data. In order to adapt the obtained models to changing hydrometeorological conditions, the existence of a relationship between the parameters of cyclonic activity and the water levels of the studied lakes was investigated. The establishment of such a relationship made it possible to proceed to the determination of numerical values of meteorological characteristics that are an indicator of the passage of a cyclone. Atmospheric pressure and relative humidity became such indicative and accessible characteristics.

Keywords: lakes, water level regime, hydrometeorological study, physical-statistical water balance approach, cyclonic activity, atmospheric pressure.

For citation: Batmazova A.A. Application of a Hierarchical Approach to Modeling the Water Level Regime of Small and Medium-Sized Lakes in North-West Russia. *The Bulletin of Irkutsk State University. Series Earth Sciences*, 2025, vol. 53, pp. 20-38. <https://doi.org/10.26516/2073-3402.2025.53.20> (in Russian)

Введение

В условиях современных климатических изменений существенно возрастает необходимость совершенствования и адаптации системы прогноза и моделирования уровня режима озер, являющегося интегральным показателем изменяющегося климата [Global ... , 2020]. Исследование водоемов с точки зрения гидроэкологических и гидротермических составляющих, на что нацелено большинство современных моделей [Моделирование ... , 2021; Данчев, 2013], в отрыве от их связи с уровнем воды может не в полной мере способствовать пониманию закономерностей влияния климатических изменений на состояние озерных систем.

Цель данной статьи – описание принципа разработки комплекса иерархических моделей для средних и малых озер Северо-Западного региона России. В рамках настоящего исследования под иерархией следует понимать изучение формирования уровня режима в локальном масштабе, как следствие процессов, происходящих на водосборе, и с точки зрения макромасштабных процессов – с помощью показателей циклонической деятельности. Применение иерархичного принципа обусловлено решением вопроса о дефиците исходной гидрометеорологической информации.

Представленные в статье модели понятны с физической точки зрения и просты в применении ввиду использования в них доступных гидрометеорологических данных, практически не требующих дополнительных преобразований и обработки. Актуальным является то, что разработанные модели применимы к малоизученным в гидрометеорологическом плане территориям, что может существенно облегчить процесс и расширить возможности изучения малых и средних озерных систем, которых преимущественно больше на территории России. Второй актуальный момент заключается в рассмотрении влияющих на уровеньный режим озер характеристик макромасштабного уровня, а именно циклонической деятельности, что позволит пересмотреть вопрос о заблаговременности при моделировании и прогнозировании уровняного режима озер.

Для достижения поставленной цели решаются следующие задачи:

- 1) анализ районов и объектов исследования на предмет обеспеченности необходимой гидрометеорологической информацией и определение репрезентативных метеорологических станций;
- 2) определение альтернативных предикторов прогностических регрессионных моделей, описывающих формирование уровняного режима малых и средних озер, и физико-статистическое обоснование выявленных предикторов;
- 3) построение статистически адекватных и физически обоснованных регрессионных моделей с различной заблаговременностью, анализ их эффективности;
- 4) анализ связи циклонической активности с уровнемным режимом малых и средних озер исследуемой территории и определение значений атмосферного давления, характеризующих циклоническую деятельность.

Объекты исследования

В исследовании рассмотрено 11 малых и средних озер (в том числе и озера-водохранилища), отобранных по классификации Р. А. Нежиховского [Нежиховский, 1988], северо-запада России, относящиеся к бассейнам Балтийского, Белого и Баренцева морей, имеющие данные за период наблюдений с 2008 по 2022 г.

Информация об исследуемых водоемах представлена в табл. 1.

Таблица 1

Объекты исследования

Водный объект	Бассейн моря	Площадь зеркала, км ²	Зарегулированность
Ведлозеро	Балтийское	58	Сезонное
Лексозеро		166	н/з*
Санда		185	Сезонное, частично многолетнее
Суоярви		58,5	н/з
Верхнее Куйто	Белое	240	н/з
Ондозеро		182	Сезонное
Пермусозеро		24,2	н/з
Лекшмозеро		54,4	н/з
Ловозеро	Баренцево	208,5	Сезонное, многолетнее
Куэтсъярви		17	н/з, периодически находится в подпоре
Пулозеро		8,62	н/з

* н/з – озеро не зарегулировано.

Результаты исследования и их обсуждение

1. Общий период наблюдений и подбор репрезентативных метеостанций

Для оценки гидрометеорологической изученности проводился анализ информации о действующей озерной гидрологической сети, что позволило сделать вывод о недостаточной освещенности исследуемой территории исходными данными. На территории Северо-Западного федерального округа более 300 тыс. озер, из которых, по данным каталога пунктов озерной гидрологической сети Росгидромета¹, только 64, включая водохранилища, оснащены озерными гидрологическими постами. Сопоставление рядов гидрометеорологических наблюдений исследуемых озер, выпадающих и вытекающих из них рек и расположенных вблизи метеорологических станций (рис. 1) показало отсутствие единого продолжительного периода наблюдений в связи с пропусками в рядах данных или полным отсутствием тех или иных гидрометеорологических характеристик. Поэтому было принято решение использовать более короткий ряд (2008–2022 гг.), но без пропусков, а также находящийся в открытом доступе, а именно на порталах АИС ГМВО, ВНИИГМИ МЦД и *rp5.ru*.

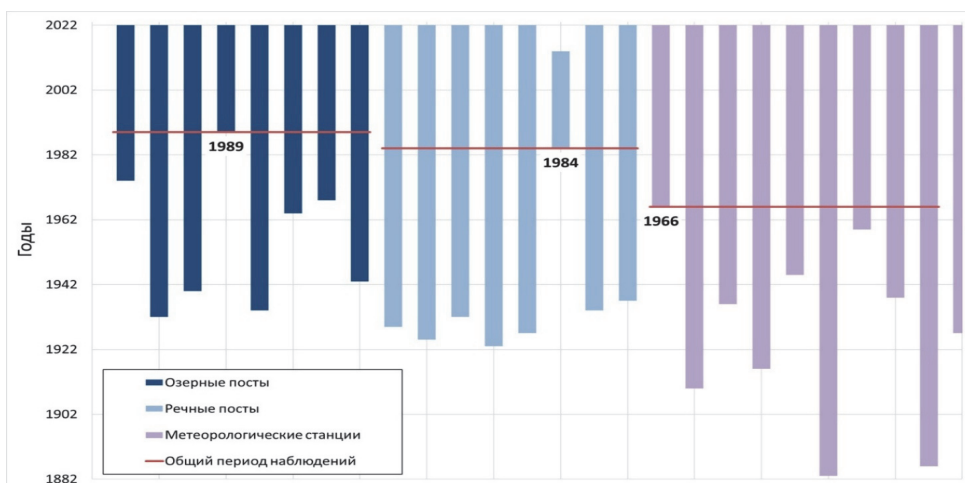


Рис. 1. Общий период гидрометеорологических наблюдений озерных систем Северо-Западного региона

Ввиду установленного недостатка исходной гидрометеорологической информации встал вопрос о подборе репрезентативных метеостанций, а именно об усовершенствовании подхода по их определению.

¹ Водный кадастр Российской Федерации. Каталог пунктов озерной гидрологической сети Росгидромета в 2022 году : справ. изд. СПб. : РИАН, 2023. 55 с.

В нормативной документации² фигурируют условия, соблюдение которых необходимо для того, чтобы считать метеорологическую станцию репрезентативной по отношению к исследуемому объекту – это расположение в однородных физико-географических условиях в пределах «радиуса репрезентативности». В своде правил «Строительная климатология»³ этот радиус репрезентативности сопоставляется с условием о необходимости наличия расстояния между гидрологическим постом и метеорологической станцией не более 100 км.

Для удовлетворения последнего условия была написана программа *DistHyd* на базе приложения *Matlab*, позволяющая определить набор метеостанций для конкретного гидрологического поста. Программа *DistHyd* выдает список метеостанций, расположенных на расстоянии не более 100 км, далее начинается этап ручной экспертной оценки, в начале которого осуществляется проверка выведенных программой метеостанций на наличие исходных данных. После исключения станций, неудовлетворяющих условиям наличия данных и необходимого периода наблюдений, производится оценка однородности физико-географических условий. Последним этапом является проверка наличия связи между метеопараметрами и уровнем воды в озере, осуществляется с помощью корреляционного анализа и метода графов, который также реализуется с помощью авторской программы. После всех описанных этапов выполняется осреднение метеопараметров тех станций, для которых теснота связи, т.е. коэффициент корреляции, согласно шкале Чеддока, относится к категориям «умеренная» и «тесная» [Бондарчук, Бондарчук, 2018; Gardener, 2017]. Таким образом, для построения прогностических моделей исследуемых озер формируются ряды метеорологических величин, удовлетворяющие условиям о ближайшем расстоянии и об однородности физико-географического района. В табл. 2 приведена информация о гидрометеорологической изученности исследуемых территорий: озера, притоки, оттоки и их посты, метеорологические станции.

Таблица 2

Сводная таблица гидрометеорологической изученности

Озеро – пост	Река – пост	Метеостанция
Ведлозеро – с. Ведлозеро	Видлица – с. Большие Горы	Лодейное Поле, Сортавала, Петрозаводск
Лексозеро – с. Реболы	Лендерка – с. Лендеры	Паданы, Реболы
Сандал – д. Тивдия	Суна – д. Кивач	Петрозаводск, Паданы
Суоярви – г. Суоярви	Шуя – д. Бесовец	Сортавала, Кондопога
Куэтсьярви – пгт Никель	Колосйоки – пгт Никель, Паз – Неллим	Янискоски, Никель, Неллим
Пулозеро – ст. Пулозеро	Кола – 1420-й км	Мончегорск, Мурманск
Ловозеро – с. Ловозеро	Сергевань – 3 км	Ловозеро, Краснощелье
Пермусозеро – г. Оленегорск	Куреньга – г. Оленегорск	Мончегорск, Мурманск

² Свод правил СП 482.1325800.2020. Инженерно-гидрометеорологические изыскания для строительства. Общие правила М. : Стандартинформ, 2020. 42 с.

³ Свод правил СП 131.13330.2020. СНиП 23-01-99* Строительная климатология. М. : Минстрой России, 2020. 234 с.

Окончание табл. 2

Озеро – пост	Река – пост	Метеостанция
Ондозеро – д. Ондозеро	Онда – д. Лососий Порог	Реболы, Сегежа
Лекшмозеро – с. Орлово	Лекшма – д. Кузьмино	Пудож, Коневе
Верхнее Куйто – с. Вокнаволок	Войница – п. Войница, Судно – д. Вокнаволок	Калевала

На рис. 2 приведен пример работы программы *DistHyd*, на котором изображены репрезентативные метеостанции для оз. Лекшмозеро.

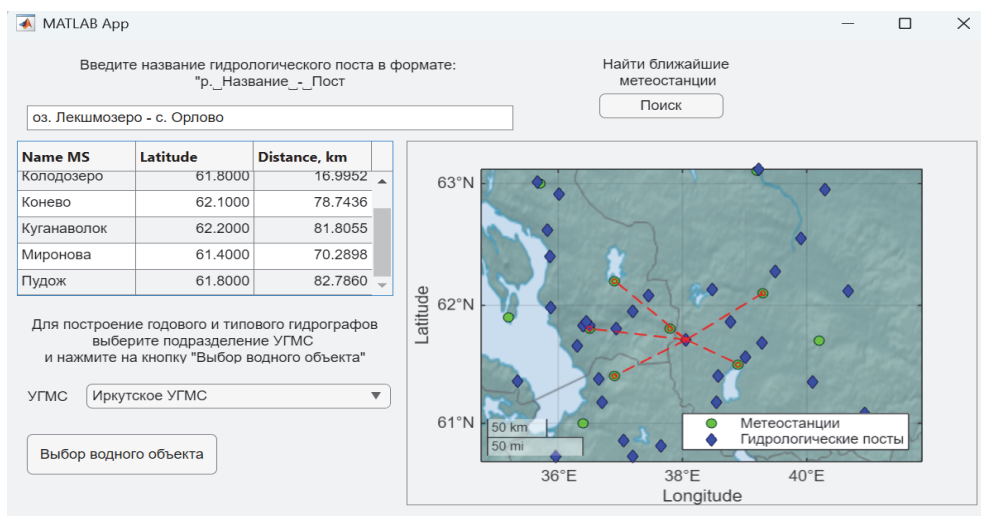


Рис. 2. Пример работы программы *DistHyd* по определению репрезентативных метеорологических станций к ОГП оз. Лекшмозеро, бассейн Белого моря

2. Физико-статистический воднобалансовый подбор альтернативных предикторов

Часто построение достоверных прогнозных регрессионных уравнений затруднено в связи со сложностями в учете и использовании атмосферных осадков [Назарова, 2010], а также недостаточностью необходимых исходных данных, связанных с неравномерной гидрометеорологической сетью [Challenges ... , 2015], о чем речь шла выше. Поэтому возникает необходимость в поиске альтернативных предикторов. Предлагаемый подход по определению альтернативных предикторов подробно изложен и апробирован как на озерах Северо-Западного региона России [Батмазова, Гайдукова, 2025; Батмазова, Гайдукова, 2025], так и на горном озере-водохранилище Арпи, расположенном на севере Республики Армения [Батмазова, 2025].

Суть подхода состоит в восприятии общего вида уравнения водного баланса (УВБ) (1) для моделирования уровня режима озер [Haghighi, Kløve, 2015; Crapper, Fleming, Kalma, 1996] как замкнутой иерархической структуры, что позволяет разложить составляющие уравнения (1) на образу-

ющие их факторы, а применение к (1) аппарата множественной линейной регрессии [Иофин, 2013], представленного в форме уравнения (2) и стандартных его методов (как, например, метод пошагового исключения), дает возможность статистически обосновать использование других гидрометеорологических характеристик в регрессионных уравнениях, моделирующих уровеньный режим озер.

$$Y = X - Z \pm \Delta, \quad (1)$$

$$y = b_1x_1 + \dots + b_nx_n + b_0 + \varepsilon. \quad (2)$$

Уравнения (1) и (2) описывают следующие переменные: Y – стоковая характеристика, она же y – функция отклика, представленная уровнем воды в озере $H_{оз}$; X – приходная составляющая, она выражена через $x_1 \dots x_n$ – параметр регрессионного уравнения, т. е. функция влияния. В уравнении водного баланса может выражаться через поверхностный приток в озеро за счет впадающей реки – $H_{пр}$; склоновый сток вследствие таяния снега – S ; а также атмосферные осадки – Rr ; Z – расходная составляющая, в регрессионном уравнении также выражена через $x_1 \dots x_n$, может быть представлена в виде вытекающей из озера реки – $H_{от}$; Δ – неучтенные факторы; в регрессионном уравнении представлены в виде параметра ε – это невязка водного баланса, в которую входят не поддающиеся учету элементы.

Все перечисленные характеристики масштабировались до формирующих их составляющих [Gunawardhana, Al-Rawas, Kazama, 2017] (осадки, например, раскладывались на облачность, атмосферное давление и относительную влажность воздуха), подвергались регрессионному анализу и, таким образом, для каждого из исследуемых озер был определен набор физически и статистически обоснованных альтернативных предикторов для построения прогностических моделей, описывающих уровеньный режим водоемов. Обобщенная информация о предикторах представлена в табл. 3, где $H_{пр}$ – уровень воды всех имеющихся у озер притоков, см; $H_{от}$ – уровень воды вытекающих из озер рек, см; U – относительная влажность воздуха, %; S – высота снежного покрова, см; d – дефицит насыщения водяного пара, мб.

Таблица 3

Предикторы для построения моделей

Предиктор Озеро	$H_{пр}$	$H_{от}$	U	S	d
Ведлозеро		+	+	+	
Лексозеро		+	+	+	
Санда		+	+	+	+
Суоярви		+	+	+	
Верхнее Куйто	+		+		+
Лекшмозеро		+	+		+
Ондозеро		+	+		
Пермусозеро		+	+	+	
Куэтсъярви	+	+	+		
Пулозеро		+	+	+	
Ловозеро	+	+	+		

Анализ данных табл. 3 позволяет сделать следующие выводы:

– для всех исследуемых озер постоянным предиктором является относительная влажность воздуха. Это обусловлено отсутствием в качестве предиктора практически у всех озер уровня воды реки-притока, которое связано с тем, что на впадающих реках не организованы гидрологические посты. Для озер, у которых есть данные по реке-притоку (Верхнее Куйто, Куэтсъярви, Ловозеро) относительная влажность воздуха все равно учитывается как характеристика, заменяющая атмосферные осадки [The Changing ... , 2003];

– дефицит насыщения водяного пара как расходная составляющая водного баланса, характеризующая испарение [Massmann, Gentine, Lin, 2019], в качестве предиктора используется в тех моделях, где либо нет реки-оттока (Верхнее Куйто), либо расходная составляющая выражена рекой-оттоком косвенно, как, например, у оз. Сандал;

– высота снежного покрова используется в качестве предиктора для моделей озер, у которых отсутствует приходная составляющая $H_{пр}$. Исключением являются озера Лекшмозеро и Ондозеро, для которых S в ходе проверки оказалась незначимой.

3. Прогнозные регрессионные модели и анализ их эффективности

По полученным предикторам были выведены регрессионные уравнения, позволяющие моделировать уровенный режим озер с оптимальной заблаговременностью.

Период калибровки ограничивался годами с 2008 по 2021, независимый период, на котором проводилась апробация полученных моделей, включал данные за 2022 г. При построении уравнений использовались разные шаги дискретизации, выбор которых зависел от того, является ли озеро зарегулированным (см. табл. 1). Для незарегулированных озер в качестве наилучшего периода заблаговременности (с наивысшим для моделей значением коэффициента детерминации R^2 и критериями эффективности NSE , S/σ_Δ и S/σ) был определен временной сдвиг $\tau = 3$ сут., а для зарегулированных озер оптимальная заблаговременность – $\tau = 1$ мес.

После вывода регрессионных моделей строились частотная гистограмма и диаграмма рассеяния для анализа остатков уравнения регрессии. Это позволило сделать вывод о том, что для всех озер бассейнов Балтийского, Баренцева и Белого морей в соотношении остатков и предсказанных значений зависимости не наблюдается. Исключением является оз. Куэтсъярви, у которого была обнаружена линеаризация выборки небольших по значению остатков, наблюдающихся в интервале максимальных значений уровней воды малых обеспеченностей – можно предположить, что зависимость остатков от смоделированных величин, лежащих в малых обеспеченностях, связана с пассивным регулированием оз. Куэтсъярви через р. Паз.

В качестве примера в табл. 4 приведены уравнения за период калибровки и оценки их эффективности для некоторых исследуемых озер, с учетом заблаговременности и различной дискретизацией исходных данных: оз. Ведлюзеро с заблаговременностью $\tau = 1$ месяц; оз. Куэтсъярви и оз. Верхнее Куйто с заблаговременностью $\tau = 3$ сут. На рис. 3 представлены графики хода фактических и смоделированных уровней воды за независимый период – 2022 г.

Таблица 4

Модели и оценка эффективности

Озеро	Уравнение	Критерии эффективности			
		R^2	S/σ_Δ	NSE	$P, \%$
Ведлозеро	$H_{оз} = 0,90H_{от} - 0,117U - 0,103S$	0,86	–	0,86	96,4
Куэтсьярви	$H_{оз} = 0,94H_{пр} + 0,028H_{от} + 0,019U$	0,89	0,85	0,89	77,3
Верхнее Куйто	$H_{оз} = 0,55H_{пр1} + 0,43H_{пр2} + 0,076U + 0,065d$	0,94	1,56	0,94	50,5

Оценка эффективности уравнений, представленных в табл. 4, производится по критерию Гидрометцентра – S/σ_Δ [Георгиевский, Шаночкин, 2013] и зарубежному критерию Нэша – Сатклиффа NSE [The rise ..., 2025].

Анализ прогностических регрессионных моделей, оценок их эффективности, а также графического материала позволяет сделать следующие выводы:

– коэффициент детерминации R^2 моделей, построенных по данным как с суточной, так и с месячной дискретностью, изменяется от 0,86 до 0,94, что говорит о том, что выведенные модели объясняют от 86 до 94 % дисперсии зависимой переменной;

– критерии эффективности S/σ_Δ и S/σ ведут себя неоднозначно и значения их соответствуют условию $S/\sigma \leq 0,80$ при $n \geq 25$ в случае, когда уравнения построены по данным с месячной дискретизацией данных. Это продемонстрировано как в табл. 4, так и в целом характерно для исследуемых озер. Уравнения, построенные по данным с суточной дискретностью, не всегда можно считать удовлетворительными по критерию S/σ_Δ , что, однако, не находит отражения при оценке критерия Нэша–Сатклиффа, характеризующего модель как «очень хорошую» при $0,75 < NSE \leq 1,00$; «хорошую» при $0,65 < NSE \leq 0,75$; «удовлетворительную» при $0,50 < NSE \leq 0,65$; и «неудовлетворительную» при $NSE \leq 0,50$ [Model ..., 2007].

Таким образом, можно сделать вывод о том, что наиболее неоднозначные результаты характерны для моделей, построенных по суточным данным. Это можно объяснить возможностью более явно отслеживать динамику изменения уровней воды по месячным данным ввиду высокой инерционности озер [Global ..., 2021]. Различия в значениях критериев эффективности полученных моделей обусловлены физико-географическими особенностями исследуемых озер и в целом большинство результатов можно считать удовлетворительными. Примеры из прогностической практики часто показывают несовпадение именно для краткосрочных прогнозов между отечественным и зарубежным критериями. Для месячных прогнозов критерии эффективности совпадают. Поэтому целесообразно оценивать эффективность прогностических методик по обоим критериям, а также выполнять анализ графического материала, который (см. рис. 3) иллюстрирует синхронность колебаний фактических и смоделированных уровней воды и улавливание пиков.

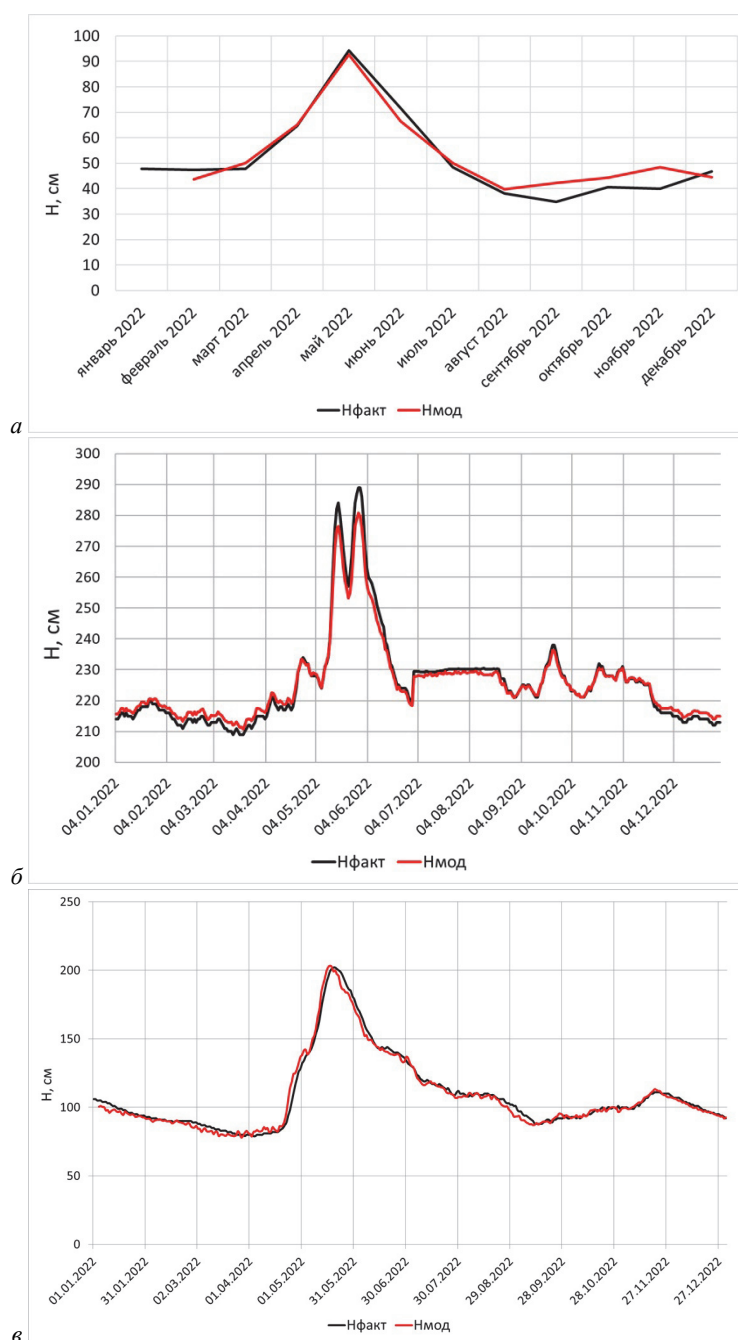


Рис. 3. График изменений фактических и смоделированных уровней воды за 2022 г.:
a – оз. Ведлозеро; *б* – оз. Куэтсьярви; *в* – оз. Верхнее Куйто

4. Связь уровневого режима с циклонической активностью

Согласно Второму оценочному докладу Росгидромета⁴ об изменениях климата и Докладу Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды⁵, на территории Российской Федерации за период 1936–2010 гг. отмечается увеличение годовых сумм осадков практически на всей территории европейской части России. В Третьем оценочном докладе Росгидромета⁶ об изменениях климата на территории России отмечен рост общего числа внетропических циклонов в Северном полушарии.

Поскольку циклоническая деятельность является необходимым условием влагооборота [Швер, 1984], так как именно в циклонах осаждается влага, перенесенная с океана, то можно сделать вывод, что в масштабе глобальных оценок оперируют не количеством и интенсивностью осадков, а циклонической активностью, поэтому возникает необходимость в конкретизации факторов, влияющих на осадковыпадение, а именно – на численные значения характеристик, описывающих циклоническую деятельность.

На данном этапе рассматривается влияние параметров циклонической деятельности, зафиксированных над бассейнами Балтийского, Баренцева и Белого морей, на уровневый режим озер района исследований и на осадковыпадение, фиксируемое указанными ранее репрезентативными метеорологическими станциями, а также определяются характерные при прохождении циклонов величины атмосферного давления.

Мировые достижения в области изучения влияния циклонической активности на изменение уровня воды в озерах описаны в различных исследованиях. Так, например, в работе хорватских ученых [High-frequency ... , 2025] исследуются колебания уровня воды в мелководном оз. Врана в зависимости от зимней циклонической активности; в статье [Табелинова, 2019] рассматривается изменение уровневого режима оз. Балхаш и Каспийского моря в зависимости от направления траекторий циклонов.

Значимость атмосферного давления как показателя циклонической деятельности также описана в трудах отечественных и зарубежных исследователей. На примере наводнения на р. Амур [Мезенцева, Соколова, Друзь, 2015] делается акцент на том, что, несмотря на типичную для сезона повторяемость циклонов, именно их глубина, являющаяся разностью геопотенциальных высот в центре циклона и на внешней ограничивающей изогипсе, поспособствовала интенсивному выпадению осадков, приведшему к катастрофе. В исследованиях [Parfitt, Czaja, Seo, 2017; Contreras-Rojas, Mardones, Sobarzo, 2025] приводится описание идентификации атмосферных фронтов с помощью параметра теплового фронта, основанного на поведении выбранной метеорологической характеристики при определенном уровне атмосферного давления. На примере прибрежных городов в [Compound ... , 2022]

⁴ Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М. : Росгидромет, 2014. 60 с.

⁵ Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2020 год. М., 2021. 104 с.

⁶ Третий оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Общее резюме. М. : Росгидромет, 2022. 122 с.

моделируются тропические циклоны посредством включения в модель сгенерированных полей атмосферного давления и ветра.

Для достижения поставленной цели использовались данные о циклонической деятельности над Балтийским, Баренцевым и Белым морями, взятые из каталогов интегральных показателей циклонической активности⁷.

Первая задача стояла в определении градаций количества месячных атмосферных осадков, уровней воды озер и циклонической активности, которая характеризуется повторяемостью циклонов, количеством траекторий и интенсивностью. Далее, с использованием корреляционного анализа выявлялись связи между величинами, вошедшими в перечисленные градации. После этого для каждого озера определялись типовые месяцы, т. е. месяцы, совпадающие для перечисленных характеристик по градациям: периодам минимальной водности соответствуют периоды с минимальным количеством выпавших атмосферных осадков при слабой циклонической деятельности. И последним этапом являются построение и анализ гистограмм рядов значений атмосферного давления за каждый типовой месяц, представленных в интервальном виде.

В связи с сильным влиянием Баренцева моря на Белое, определение градаций и типовых месяцев, выявление связей и интервальный анализ проводились по данным о циклонической активности над Баренцевым морем.

Таким образом, в результате описанных выше действий были определены градации водности и соответствующие им типовые месяцы для всех исследуемых озер. Общими типовыми месяцами для всех озер района исследований являются: апрель – для минимальной градации водности, сентябрь и декабрь – для средней градации, июнь и июль – для максимальной градации водности.

Анализ связей между уровнями воды и циклонической активностью ($H-N_{cy}$), уровнями воды и атмосферными осадками ($H-X$), циклонической активностью и атмосферными осадками ($N_{cy}-X$) осуществлялся с помощью корреляционного анализа и был визуализирован в виде графов. В качестве примера на рис. 4 приведены графы для некоторых исследуемых озер. Узлами графов являются циклоническая активность N_{cy} ; уровни воды и атмосферные осадки по градациям водности H_{min} , H_{aver} , H_{max} и X_{min} , X_{aver} , X_{max} (минимальная, средняя и максимальная соответственно). Ребра графов – коэффициенты корреляции между узлами.

Для оценки достоверности коэффициентов корреляции проверялось следующее условие: $|r|/\sigma_r \geq 2$, где $|r|$ – абсолютное значение коэффициента корреляции; σ_r – стандартная ошибка коэффициента корреляции. Соблюдение этого условия говорит о достоверности связи между переменными.

⁷ Единая государственная система информации об обстановке в Мировом океане. URL: <http://portal.esimo.ru/portal/> (дата обращения: 31.03.2025).

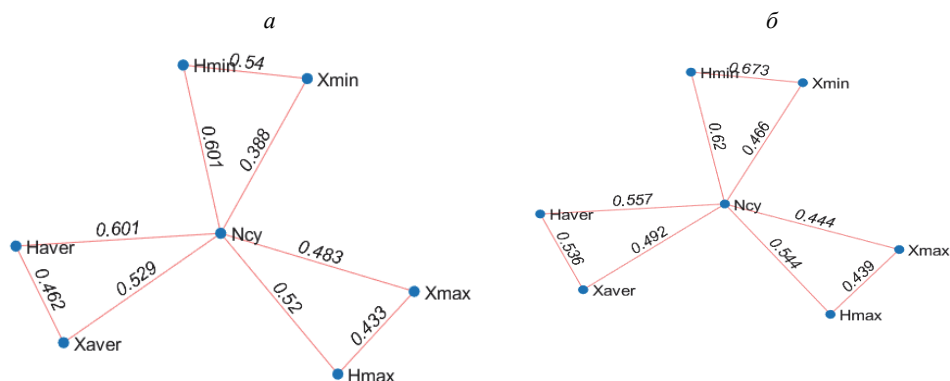


Рис. 4. Корреляционные графы: *а* – оз. Ведлозеро; *б* – оз. Пулозеро

На графах видно, что коэффициент корреляции между исследуемыми величинами изменяется от 0,388 до 0,673, что интерпретируется как «умеренная» и «заметная» связь. Можно заметить, что значение коэффициента корреляции в большинстве пар $H-Ncy$ превышает коэффициенты корреляции остальных пар. Условие $|r|/\sigma_r \geq 2$ соблюдается для всех исследуемых в статье озер и изменяется от 2,00 до 3,96, что говорит о надежности рассчитанных коэффициентов корреляции.

Далее необходимо определить, на какие численные значения атмосферного давления и относительной влажности воздуха, характеризующего циклоническую деятельность, прогностическая система, т. е. озеро, будет реагировать. Для этого с помощью гистограмм, построенных в авторской программе, проводится анализ рядов атмосферного давления и относительной влажности воздуха, представленных в интервальном виде, на репрезентативных метеостанциях.

Для подсчета частоты стояния пониженного атмосферного давления на уровне станции и на уровне моря (P_0 и P соответственно) и повышенной влажности воздуха (U) за типовые месяцы значения P_0 , P и U располагаются в порядке убывания и делятся на равные интервалы. Затем подсчитывается число случаев в месяц, когда давление и влажность были в пределах конкретного диапазона значений. Пример комплексной гистограммы представлен на рис. 5, где по оси абсцисс расположены значения атмосферного давления и относительной влажности воздуха в интервальном виде.

Теснота связи между выявленными интервалами давлений и влажности с циклонической деятельностью определялась с помощью корреляционного анализа, результаты которого интерпретируются как «умеренная» и «заметная» связь с коэффициентами корреляции, изменяющимися в диапазоне от 0,44 до 0,73.

Таким образом, были определены диапазоны значений атмосферного давления и относительной влажности воздуха, характерные для циклонической деятельности трех типов водности исследуемых озер. Для озер бассейна Балтийского моря определяющими являются значения давлений в диапазо-

нах 740–750, 720–730 и 750–760 мм рт. ст. для минимальной, средней и максимальной влажности соответственно. Для озер бассейна Баренцева моря определяющими являются значения давлений в диапазонах 740–750 и 750–760 мм рт. ст., также значимой связью с циклонической деятельностью обладают значения давлений в диапазоне 730–740 мм рт. ст. Для озер бассейна Белого моря определяющими являются значения давлений в диапазонах 730–740, 740–750 и 750–760 мм рт. ст. В общем для озер исследуемой территории характерными являются значения атмосферного давления, изменяющиеся в пределах 740–750 и 750–760 мм рт. ст., также наблюдаются случаи глубоких циклонов (720–730 и 730–740 мм рт. ст.).

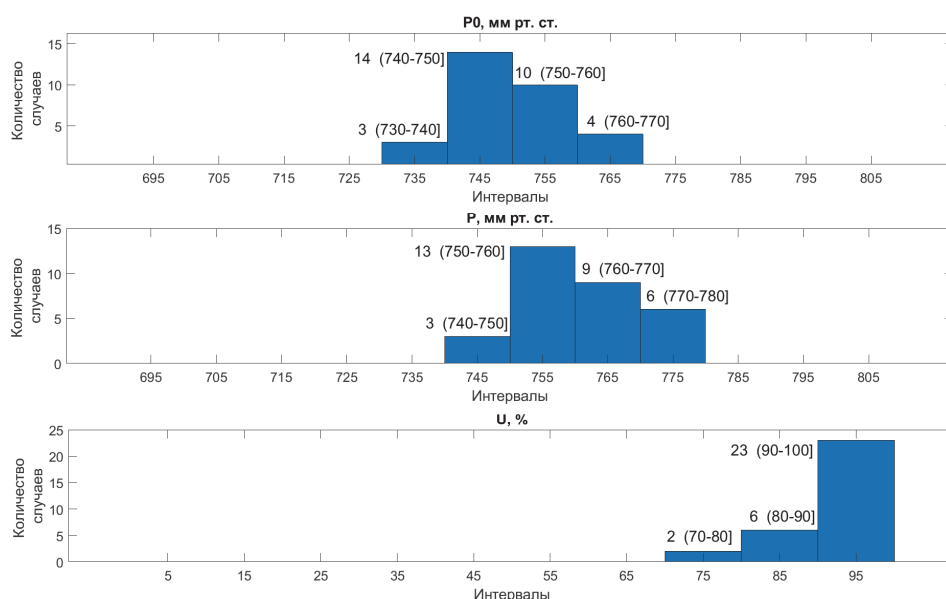


Рис. 5. Комплексная гистограмма за декабрь 2008 г., метеостанция Калевала

Выводы

В статье представлен процесс разработки комплекса иерархических моделей для моделирования уровня режима малых и средних озер Северо-Западного региона России. Раскрыта суть иерархического подхода, заключающаяся в использовании разномасштабных процессов при изучении формирования уровня режима озер.

Выдвинута и обоснована гипотеза о недостатке исходной гидрометеорологической информации района исследования, затрудняющем изучение водных объектов. Предложены пути решения этой проблемы, одним из которых является экспертный подбор репрезентативных метеорологических станций для озерных водосборов с помощью авторской программы.

Вторым способом решения проблемы стал поиск таких предикторов прогностических уравнений, которые могут физически и статистически обоснованно заменить атмосферные осадки и испарение. Для этого задействован подход, в основе которого – аппарат множественной линейной регрессии и уравнение водного баланса, что позволяет осуществить замену недостающих составляющих УВБ на альтернативные. В результате был установлен ряд закономерностей и определен набор предикторов для каждого из исследуемых озер. В состав предикторов вошли уровни воды рек, выпадающих и вытекающих из озер ($H_{\text{пр}}$ и $H_{\text{от}}$ соответственно), относительная влажность воздуха (U), высота снежного покрова (S) и дефицит насыщения водяного пара (d).

Перечисленные предикторы вошли в прогностические модели, построение которых осуществлялось с помощью аппарата множественной линейной регрессии и метода графов, реализованного в авторской программе. Наилучшие результаты по критериям эффективности показали модели, построенные по данным с месячной дискретностью.

Выявлены закономерности между циклонической активностью и уровнем режимом исследуемых озер, а также определены характерные при прохождении циклонов величины атмосферного давления, которые изменяются в пределах 740–750 и 750–760 мм рт. ст., со случаями глубоких циклонов, характеризующихся атмосферным давлением в диапазонах 720–730 и 730–740 мм рт. ст. Общими типовыми месяцами для всех озер района исследований являются: апрель – для минимальной градации водности, сентябрь и декабрь – для средней градации, июнь и июль – для максимальной градации водности.

Анализ формирования уровня режима озер с точки зрения влияния макромасштабных процессов осуществлялся с привлечением данных о циклонической активности. С помощью метода графов оценивалось наличие связи между уровнями воды озер различных градаций водности и атмосферными осадками на репрезентативных метеостанциях. Выявлены и описаны закономерности, касающиеся не только влияния циклонической активности на уровень режим озер, но и определения значений атмосферного давления, лежащего в «циклонических» диапазонах для исследуемых озер бассейнов Балтийского, Баренцева и Белого морей, которые могут использоваться в качестве индикатора, позволяющего зафиксировать надвигающийся циклон и с обозначенной в статье заблаговременностью спрогнозировать изменение уровней воды в озерах.

Таким образом, можно сделать вывод о возможности создания и применения прогностических регрессионных моделей в условиях слабой обеспеченности исходной гидрометеорологической информацией. Использование в полученных моделях альтернативных предикторов в совокупности с учетом крупномасштабных процессов позволит рассматривать формирование уровня режима озер на другом уровне, что может повысить адаптационную способность модели к изменяющимся внешним воздействиям.

Список литературы

Батмазова А. А., Гайдукова Е. В. Метод удлинения рядов наблюдений за уровнями воды в озерах Карелии // Вестник Удмуртского университета. Серия: Биология. Науки о Земле. 2025. Т. 35, вып. 1. С. 70–80. <https://doi.org/10.35634/2412-9518-2025-35-1-70-80>

Батмазова А. А. Моделирование уровня режима озера Арпи // Proceedings of the Yerevan State University, Geology and Geography. 2025. Т. 59, вып. 2 (266). С. 175–180. <https://doi.org/10.46991/PYSUC.2025.59.2.175>

Батмазова А. А., Гайдукова Е. В. Построение регрессионных моделей для оценки уровня режима озер северо-западной части России // Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 151–165. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2025-78-151-165>

Бондарчук С. С., Бондарчук И. С. Статобработка экспериментальных данных в MS Excel : учеб. пособие. Томск : Изд-во Том. гос. пед. ун-та, 2018. 433 с.

Георгиевский Ю. М., Шаночкин С. В. Гидрологические прогнозы : учебник. СПб. : РГТМУ, 2013. 436 с.

Данчев В. Н. Разработка и применение информационно-вычислительного комплекса для моделирования циркуляций и термического режима Телецкого озера : автореф. дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск : ИВЭП СО РАН, 2013. 16 с.

Иофин З. К. Теоретическое обоснование линейно-корреляционной модели водного баланса // Вестник ГУМРФ. 2013. № 3 (19). С. 18–27.

Моделирование в озерах. Опыт ИНОЗ РАН / С. А. Кондратьев, М. В. Шмакова, С. Д. Голосов [и др.] // Гидрометеорология и экология. 2021. № 65. С. 607–647. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2021-65-607-647>

Мезенцева Л. И., Соколов О. В., Друзь Н. И. Атмосферная циркуляция над Дальним Востоком в 2013 г. при экстремальном наводнении в бассейне Амура // Известия Тихоокеанского научного института рыбного хозяйства. 2015. Т. 180. С. 261–272. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2015-180-261-272>

Назарова Л. Е. Изменение глобального и регионального климата // Водная среда: обучение для устойчивого развития. Петрозаводск : Карел. науч. центр РАН, 2010. С. 55–64.

Нежиховский Р. А. Наводнения на реках и озерах. Л. : Гидрометеиздат, 1988. 183 с.

Табелинова А. С. Колебания уровня Каспийского моря: причины, последствия и методы исследования // Евразийский союз ученых (ЕСУ). 2019. Т. 4, вып. 61. С. 34–40. <https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2019.7.61.57>

Швер Ц. А. Атмосферные осадки на территории СССР. Л. : Гидрометеиздат, 1984. 285 с.

Challenges in quantifying changes in the global water cycle / G. C. Hegerl, E. Black, R. P. Allan [et al.] // Bulletin of the American Meteorological Society. 2015. Vol. 96. P. 1097–1115. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00212.1>

Compound flood impact of water level and rainfall during tropical cyclone periods in a coastal city: the case of Shanghai / H. Xu, Z. Tian, L. Sun [et al.] // Natural Hazards and Earth System Sciences. 2022. Vol. 22. P. 2347–2358. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-2347-2022>

Contreras-Rojas J., Mardones P., Sobarzo M. Impact of extratropical cyclones on coastal circulation in a semi-enclosed bay within the Humboldt Current System // Ocean Science. 2025. Vol. 21. P. 497–514. <https://doi.org/10.5194/os-21-497-2025>

Crapper P. F., Fleming P. M., Kalma J. D. Prediction of lake levels using water balance models // Environmental Software. 1996. Vol. 11, N 4. P. 251–258. [https://doi.org/10.1016/S0266-9838\(96\)00018-4](https://doi.org/10.1016/S0266-9838(96)00018-4)

Gardener M. Statistics for Ecologists Using R and Excel: Data Collection, Exploration, Analysis and Presentation. Pelagic Publishing. 2017. 406 p.

Global estimation and assessment of monthly lake/reservoir water level changes using ICESat-2 ATL13 products / N. Xu, H. Zheng, Y. Ma [et al.] // Remote Sensing. 2021. Vol. 13 (14). P. 2744. <https://doi.org/10.3390/rs13142744>

Global Lake responses to climate change / R. I. Woolway, B. M. Kraemer, J. D. Lenters [et al.] // Nature Reviews Earth & Environment. 2020. Vol. 1. P. 388–403. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0067-5>

Gunawardhana L. N., Al-Rawas G. A., Kazama S. An alternative method for predicting relative humidity for climate change studies // *Meteorological Applications*. 2017. Vol. 24. P. 551–559. <https://doi.org/10.1002/met.1641>

Haghighi A. T., Kløve B. A sensitivity analysis of lake water level response to changes in climate and river regimes // *Limnologia*. 2015. Vol. 51. P. 118–130. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2015.02.001>

High-frequency water level oscillations in a coastal shallow lake / I. Vilibić, M. Bubalo, S. P. Zemunik [et al.] // *Natural Hazard*. 2025. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07506-7>

Massmann A., Gentine P., Lin C. When Does Vapor Pressure Deficit Drive or Reduce Evapotranspiration? // *Journal of advances in modeling earth systems*. 2019. Vol. 11 (10). P. 3305–3320. doi: 10.1029/2019MS001790

Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations / D. N. Moriasi, J. G. Arnold, L. M. Van [et al.] // *Transactions of the ASABE*. 2007. Vol. 50 (3). P. 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>

Parfitt R., Czaja A., Seo H. A simple diagnostic for the detection of atmospheric fronts. *Geophysical Research Letters*. 2017. Vol. 44. P. 4351–4358. <https://doi.org/10.1002/2017GL073662>

The Changing Character of Precipitation / K. E. Trenberth, A. Dai, R. M. Rasmussen [et al.] // *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2003. Vol. 84 (9). P. 1205–1218. <https://doi.org/10.1175/BAMS-84-9-1205>

The rise of the Nash-Sutcliffe efficiency in hydrology / L. A. Melsen, A. Puy, P. J. J. F. Torfs [et al.] // *Hydrological Sciences Journal*. 2025. Vol. 70, N 8. P. 1248–1259. <https://doi.org/10.1080/02626667.2025.2475105>

References

Batmazova A.A., Gajdukova E.V. Metod udlinenija rjadov nabljudenij za urovnjama vody v ozerah Karelii [Method of extending series of observations of water levels in lakes of Karelia]. *Vestnik Udmurtskogo universiteta. Serija "Biologija. Nauki o Zemle"* [Bulletin of Udmurt University. Series Biology, Earth Sciences], 2025, vol. 35, no. 1, pp. 70–80. <https://doi.org/10.35634/2412-9518-2025-35-1-70-80> (in Russian)

Batmazova A.A. Modelirovanie urovennogo rezhima ozera Arpi [Modeling the water level regime of Lake Arpi]. *Proceedings of the Yerevan State University, Geology and Geography*, 2025, vol. 59, no. 2 (266), pp. 175–180. <https://doi.org/10.46991/PYSUC.2025.59.2.175> (in Russian)

Batmazova A.A., Gajdukova E.V. Postroenie regressiionnyh modelej dlja ocenki urovennogo rezhima ozer Severo-Zapadnoj chasti Rossii [Construction of regression models for assessing the level regime of lakes in North-West Russia]. *Gidrometeorologija i jekologija* [Hydrometeorology and ecology], 2025, vol. 78, pp. 151–165. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2025-78-151-165> (in Russian)

Bondarchuk S. S., Bondarchuk I. S. *Statobrabotka jeksperimental'nyh dannyh v MS Excel* [Statistical processing of experimental data in MS Excel]. Textbook. Tomsk, TGU Publ., 2018, 433 p. (in Russian)

Georgievskij Y.M., Shanochkin S.V. *Gidrologicheskie prognozy*. [Hydrological forecasts]. SPb, RGGMU, 2013, 436 p. (in Russian)

Danchev V.N. *Razrabotka i primenenie informacionno-vychislitelnogo kompleksa dlja modelirovanija cirkuljacij i termicheskogo rezhima Teleckogo ozera* [Development and application of an information and computing complex for modeling circulation and thermal regime of Lake Teletskoye]. Cand. sci. diss. abstr. Novosibirsk, 2013, 16 p. (in Russian)

Iofin Z.K. Teoreticheskoe obosnovanie linejno-korreljacionnoj modeli vodnogo balansa [Theoretical justification of the linear-correlation model of water balance]. *Vestnik GUMRF* [Bulletin of the State University of Maritime and Inland Resources], 2013. vol. 3, no. 19, pp. 18–27. (in Russian)

Kondrat'ev S.A., Shmakova M. V., Golosov S.D. et al. Modelirovanie v ozerovedenii. Opyt INOZ RAN. [Modeling in Lake Science. Experience of the Institute of Lake Science of the Russian Academy of Sciences]. *Gidrometeorologija i jekologija* [Hydrometeorology and ecology], 2021, vol. 65, pp. 607–647. <https://doi.org/10.33933/2713-3001-2021-65-607-647>. (in Russian)

Mezenceva L.I., Sokolov O.V., Druz N.I. Atmosfernaja cirkuljacija nad Dalnim Vostokom v 2013 g. pri jekstremalnom navodnenii v bassejne Amura [Atmospheric circulation over the Far East in 2013 during extreme flooding in the Amur basin]. *Izvestija Tihookeanskogo nauchnogo instituta*

rybnogo hozjajstva [News of the Pacific Scientific Institute of Fisheries], 2015, vol. 180, pp. 261-272. <https://doi.org/10.26428/1606-9919-2015-180-261-272> (in Russian)

Nazarova L. E. *Izmenenie globalnogo i regionalnogo klimata*. [Global and regional climate change]. *Vodnaja sreda: obuchenie dlja ustojchivogo razvitiya* [Aquatic environment: training for sustainable development]. Petrozavodsk, Karelian Research Center RAS, 2010, pp. 55-64. (in Russian)

Nezhihovskij R.A. *Navodnenija na rekah i ozerah* [Flooding of rivers and lakes]. Leningrad, Gidrometeoiz Publ., 1988, 183 p. (in Russian)

Tabelinova A.S. *Kolebanija urovnja Kaspijskogo morja: prichiny, posledstvija i metody issledovanija*. [Fluctuations in the Caspian Sea level: causes, consequences and research methods]. *Evrazijskij Sojuz Uchenyh (ESU)* [Eurasian Union of Scientists (ESU)], 2019, vol. 4, no. 61, pp. 34-40. <https://doi.org/10.31618/ESU.2413-9335.2019.7.61.57> (in Russian)

Shver C. A. *Atmosfernye osadki na territorii SSSR* [Atmospheric precipitation in the territory of the USSR]. Leningrad, Gidrometeoiz Publ., 1984, 285 p. (in Russian)

Hegerl G. C. et al. Challenges in quantifying changes in the global water cycle. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2015, vol. 96, pp. 1097-1115. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-13-00212.1>

Xu H., Tian Z., Sun L. et al. Compound flood impact of water level and rainfall during tropical cyclone periods in a coastal city: the case of Shanghai. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2022, vol. 22, pp. 2347-2358. <https://doi.org/10.5194/nhess-22-2347-2022>

Contreras-Rojas J., Mardones P., Sobarzo M. Impact of extratropical cyclones on coastal circulation in a semi-enclosed bay within the Humboldt Current System. *Ocean Science*, 2025, vol. 21, pp. 497-514. <https://doi.org/10.5194/os-21-497-2025>

Crapper P.F., Fleming P.M., Kalma J.D. Prediction of lake levels using water balance models. *Environmental Software*, 1996, vol. 11, no. 4, pp. 251-258. [https://doi.org/10.1016/S0266-9838\(96\)00018-4](https://doi.org/10.1016/S0266-9838(96)00018-4)

Gardener M. *Statistics for Ecologists Using R and Excel: Data Collection, Exploration, Analysis and Presentation*. Pelagic Publishing, 2017, 406 p.

Xu N., Zheng H., Ma Y. et al. Global estimation and assessment of monthly lake/reservoir water level changes using ICESat-2 ATL13 products. *Remote Sensing*, 2021, vol. 13 (14), pp. 2744. <https://doi.org/10.3390/rs13142744>

Gunawardhana L.N., Al-Rawas G.A., Kazama S. An alternative method for predicting relative humidity for climate change studies. *Meteorological Applications*, 2017, vol. 24, pp. 551-559. <https://doi.org/10.1002/met.1641>

Woolway R.I., Kraemer B.M., Lenters J.D. et al. Global Lake responses to climate change. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020, vol. 1, pp. 388-403. <https://doi.org/10.1038/s43017-020-0067-5>

Haghighi A.T., Kløve B. A sensitivity analysis of lake water level response to changes in climate and river regimes. *Limnologia*, 2015, vol. 51, pp. 118-130. <https://doi.org/10.1016/j.limno.2015.02.001>

Vilibić I., Bubalo M., Zemunik S.P. et al. *High-frequency water level oscillations in a coastal shallow lake*. *Natural Hazards*, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11069-025-07506-7>

Massmann A., Gentile P., Lin C. When Does Vapor Pressure Deficit Drive or Reduce Evapotranspiration. *Journal of advances in modeling earth systems*, 2019, vol. 11 (10), pp. 3305-3320. <https://doi.org/10.1029/2019MS001790>

Moriasi D.N., Arnold J.G., Van L.M.W. et al. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 2007, vol. 50, no. 3, pp. 885-900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>

Parfitt R., Czaja A., Seo H. A simple diagnostic for the detection of atmospheric fronts. *Geophysical Research Letters*, 2017, vol. 44, pp. 4351-4358. <https://doi.org/10.1002/2017GL073662>

Trenberth K.E., Dai A., Rasmussen R., Parsons D.B. The Changing Character of Precipitation. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2003, vol. 84, no. 9, pp. 1205-1218. <https://doi.org/10.1175/BAMS-84-9-1205>

Melsen L. A., Puy A., Torfs P. J. J. F., Saltelli A. The rise of the Nash-Sutcliffe efficiency in hydrology. *Hydrological Sciences Journal*, 2025, vol. 70, no. 8, pp. 1248-1259. <https://doi.org/10.1080/02626667.2025.2475105>

Батмазова Анна Александровна
аспирант, ассистент,
кафедра инженерной гидрологии
Российский государственный гидрометеоро-
логический университет
Россия, 192007, г. Санкт-Петербург,
ул. Воронежская, 79
e-mail: batmazovaa@mail.ru

Batmazova Anna Aleksandrovna
Postgraduate, Assistant,
Department of Engineering Hydrology
Russian State Hydrometeorological University
79, Voronezhskaya st., St. Petersburg, 192007,
Russian Federation
e-mail: batmazovaa@mail.ru

Код научной специальности: **1.6.16**

Статья поступила в редакцию **25.08.2025**; одобрена после рецензирования **12.09.2025**; принята к публикации **15.09.2025**

The article was submitted **August, 25, 2025**; approved after reviewing **September, 12, 2025**; accepted for publication **September, 15, 2025**