

Гидрометеорология и экология. 2025. № 78. С. 151—165.  
Hydrometeorology and Ecology. 2025;(78):151—165.

## ***ГИДРОЛОГИЯ. В ПОРЯДКЕ ОБСУЖДЕНИЯ***

Научная статья

УДК 001.891.573:[556.535.2: 519.23](28)(470.2)

doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-151-165

### **Построение регрессионных моделей для оценки уровенного режима озер Северо-Западной части России**

***Анна Александровна Батмазова, Екатерина Владимировна Гайдукова***

Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург,  
Россия, batmazovaa@mail.ru

*Аннотация.* Рассматривается применение регрессионных уравнений для моделирования уровня режима озер в условиях дефицита исходной информации на примере средних и малых озер Республики Карелия, Мурманской и Архангельской областей по стандартным метеорологическим данным. В работе с помощью аппарата множественной линейной регрессии выявляются гидрометеорологические факторы, являющиеся нетипичными для моделирования уровня режима озер. Также учитывается возможный временный сдвиг при влиянии рассматриваемых факторов на искомую величину — уровень озера.

*Ключевые слова:* регрессионный анализ, относительная влажность воздуха, уровеньный режим, средние озера, малые озера.

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

*Для цитирования:* 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. doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-151-165

## ***HYDROLOGY. DISCUSSION***

Original article

### **Construction of regression models for assessing the level regime of lakes in North-West Russia**

***Anna A. Batmazova, Ekaterina V. Gaidukova***

Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia

*Summary.* The article considers the experience of using step-by-step regression analysis for modeling the level regime of lakes in conditions of a deficit of initial information using the example of medium and small lakes of the Republic of Karelia, Murmansk and Arkhangelsk regions. In the work, using the apparatus of multiple linear regression, hydrometeorological factors are identified that are atypical for modeling the level regime of lakes. A step-by-step selection of predictors was carried out with justification for their

choice. Regression equations were constructed based on data with different discreteness, which was determined depending on the degree of regulation of the lakes. An assessment of the effectiveness of regression equations constructed on both dependent and independent material was performed. The following criteria were used to evaluate the effectiveness:  $S/\sigma_A$ ,  $S/\sigma$ ,  $NSE$ . During the analysis, a constant predictor was found for all lakes - relative air humidity. It was decided to use it as a replacement for atmospheric precipitation. The best lead time for modeling water levels of unregulated lakes was determined to be three days, at which the highest coefficient of determination of the model is observed. An analysis of the efficiency of the obtained models led to the conclusion that it is better to use several criteria, since the numerical representation of some efficiency criteria does not always coincide with the conclusions that can be made when evaluating the graphic material, i.e. graphs of the course of actual and modeled water levels.

*Keywords:* regression analysis, relative humidity, level regime, medium lakes, small lakes.

*Acknowledgments:* The work was carried out within the framework of the state assignment of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation No. FSZU-2023-0002

*For citation:* Batmazova A. A., Gaidukova E. V. Construction of regression models for assessing the level regime of lakes in North-West Russia. *Gidrometeorologiya i Ekologiya = Journal of Hydrometeorology and Ecology*. 2025;(78):(151—165). doi: 10.33933/2713-3001-2025-78-151-165. (In Russ.).

## Введение

Изучение уровня режима озера как показателя водообмена является важной задачей при моделировании и прогнозировании состояния объекта с целью формирования и разработки схем использования и охраны водных ресурсов территории. Комплексному исследованию состояния водного объекта как в гидрологическом, так и в экологическом плане препятствует недостаток наблюдений на большинстве озер.

Вопрос о моделировании временных рядов гидрологических, метеорологических и экологических величин решается учеными различными подходами, но самым распространенным способом является построение регрессионных моделей (уравнений), позволяющих оценить взаимосвязь всех рассматриваемых факторов. Следует отметить, что регрессионные уравнения могут быть использованы не только для моделирования рядов, но и для их восстановления или удлинения по известным предикторам.

Например, в статье [1] авторы рассматривают возможность восстановления многолетних рядов температуры воздуха на европейской территории России на основе одного или нескольких индивидуальных аналогов по уравнению парной или множественной регрессии. Авторы статьи [2] объясняют, что метод гидрологической аналогии, требования к которому предъявляются в СП 33-101-2003, является скорее частным случаем пространственной интерполяции, и предлагают возможность формализации условий выбора аналога регрессионным уравнением с достаточно высоким коэффициентом корреляции и статистически значимыми коэффициентами. В результате на основе этого уравнения можно осуществить синтез многолетних данных в рассматриваемом пункте по информации в пункте-аналоге. В статье [3] выводятся региональные уравнения связи испаряемости и температуры воздуха, представляющие из себя полиномиальные и линейные регрессионные уравнения, которые могут использоваться для уточнения годовых и многолетних значений испаряемости, суммарного испарения для расчета притока воды в озеро и для их расчета на неизученных водосборах. В исследовании

Института водных проблем [4] рассматривается построение детерминированной физической модели колебания уровней бессточных водоемов, содержащей две компоненты: уровень водоема, формируемый водным балансом, и температуру водной поверхности, обусловленную изменениями теплового баланса. В исследовании [5] описывается моделирование колебаний уровня оз. Чаны, где подача на водосбор внешних воздействий осуществляется по двум моделям: первая модель основана на построении системы ортогональных полиномов и характеризуется линейной регрессией между смежными значениями случайных величин, а вторая модель — линейной корреляцией между равномерно распределенными значениями случайных величин, но с нелинейной регрессией между исходными случайными величинами.

В данном исследовании рассматриваются малые и средние озера (по классификации [6]) бассейнов Балтийского, Белого и Баренцева морей, расположенных на территории Республики Карелия, в Мурманской и Архангельской областях: Ведлозеро, Лексозеро, Сандал, Суоярви, Верхнее Куйто, Лёкшмозеро, Ондозеро, Пермусозеро, Ловозеро и Пулозеро. На берегах перечисленных объектов организованы реакционные зоны и расположены населенные пункты, использующие водные ресурсы в хозяйственных целях. Некоторые из исследуемых озер являются частью гидроэнергетических систем: водохранилищами являются либо сами озера, либо водохранилища находятся на вытекающих реках.

Цель данного исследования заключается в построении для уровней озер уравнений регрессии, учитывающих на водосборах рассматриваемых озер особенности изменения гидрометеорологических характеристик, которые оцениваются по доступной информации с гидропостов и метеостанций.

Для достижения цели выполнялись следующие задачи:

- выбор предикторов, которые учитывают гидрометеорологические процессы, происходящие в бассейнах Балтийского, Белого и Баренцева морей;
- построение физически обоснованных регрессионных моделей;
- оценка эффективности полученных моделей статистическими критериями.

Регрессионные модели могут быть использованы при восстановлении и/или удлинении рядов уровней воды озер. А также регрессионный анализ позволяет оценить взаимодействие характеристик и, в случае отсутствия данных наблюдения по одной из них (например, отсутствие данных по непосредственному притоку или оттоку из озера), определить связанную переменную, которая будет характеризовать изменение искомой величины.

Еще один аспект актуальности исследования заключается в применимости разрабатываемых моделей к малоизученным в гидрометеорологическом плане территориям. Определяются дополнительные характеристики, оказывающие значимые воздействия на моделируемую величину.

### **Объекты исследования и исходная информация**

Основная информация об исследуемых озерах северо-западной части России представлена в табл. 1.

Информация об исследуемых озерах  
Information about the study lakes

№	Водный объект	Площадь зеркала, км <sup>2</sup>	Площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Зарегулированность
1	Лексозеро	166	3450	–
2	Ведлозеро	58	564	Сезонное
3	Сандал	185	6620	Частично многолетнее
4	Суоярви	58,5	2120	–
5	Верхнее Куйто	240	7150	–
6	Лёкшмозеро	54,4	197	–
7	Ондозеро	182	2380	Годичное
8	Пермусозеро	24,2	503	–
9	Ловозеро	208,5	3770	Сезонное
10	Пулозеро	8,62	1130	–

На рис. 1 показано местоположение озер, речных гидрологических постов (ГП), озерных гидрологических постов (ОГП) и метеорологических станций (МС).

Озерные гидрологические посты: 1 — ОГП оз. Лексозеро — пос. Реболы [7—8]; 2 — ОГП оз. Ведлозеро — с. Ведлозеро; 3 — ОГП оз. Сандал — д. Тивдия [9—11]; 4 — ОГП оз. Суоярви — г. Суоярви; 5 — ОГП оз. Верхнее Куйто — д. Вокнаволоок; 6 — ОГП оз. Лёкшмозеро — с. Орлово; 7 — ОГП оз. Ондозеро — д. Ондозеро; 8 — оз. Пермусозеро — г. Оленегорск; 9 — ОГП оз. Ловозеро — с. Ловозеро; 10 — ОГП оз. Пулозеро — с. Пулозеро.

Гидрологические посты: ГП р. Лендерка — пос. Лендеры; ГП р. Видлица — с. Большие Горы; ГП р. Суна — д. Кивач; ГП р. Шуя — д. Бесовец; ГП р. Войница — п. Войница и р. Судно — д. Вокнаволоок; ГП р. Лёкшма — д. Кузьмино; ГП р. Онда — п. Лососий Порог; ГП р. Куреньга — г. Оленегорск; ГП р. Сергевань — 3 км от устья, р. Воронья — Исток; ГП р. Кола — 1429 км Октябрь. ж/д.

Метеорологические станции отбирались с помощью авторской программы *HMDistance* по ближайшему расстоянию к озерному гидрологическому пункту: МС Лодейное Поле, Сортавала, Петрозаводск, Паданы, Реболы, Кондопога, Краснощелье, Ловозеро, Мончегорск, Калевала, Пудож, Коннево, Сегежа, Мурманск.

По перечисленным ОГП и ГП была собрана информация по среднесуточным уровням воды озер и втекающих (вытекающих) рек, которые пересчитывались в среднемесячные или среднегодовые значения соответственно для озер с сезонной и многолетней зарегулированностью. В базу данных был включен период с 2008 г. по 2022 г.

База данных была дополнена рядами метеорологических характеристик с суточной дискретностью: среднесуточная температура воздуха ( $T$ ); атмосферное давление на уровне станции ( $P_0$ ) и на уровне моря ( $P$ ); относительная влажность воздуха ( $U$ ); среднесуточная скорость ветра ( $Ff$ ); температура точки росы ( $Td$ );

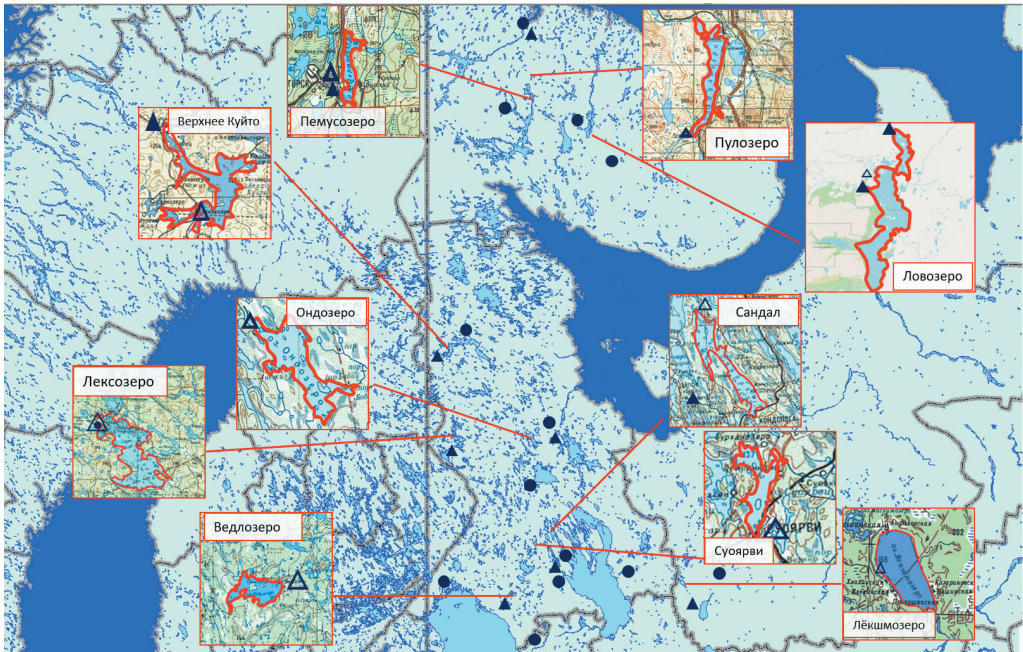


Рис. 1. Карта-схема гидрометеорологической изученности исследуемых озер.

● — метеостанция; ▲ — речной гидропост; △ — озерный гидропост; — — границы озер.

Fig. 1. Basemap of hydrometeorological study of studied lakes.

● — meteorostation; ▲ — river hydropost; △ — lake hydropost; — — lake boundaries.

облачность нижнего яруса ( $Cld$ ) [12]; атмосферные осадки ( $RR$ ); высота снежного покрова ( $S$ ); дефицит насыщения водяного пара ( $Def$ ).

### Методика исследования

В исследовании осуществляется построение регрессионных уравнений, в которых искомой характеристикой является уровень воды в озере, а предикторами — значимые для уровня режима озер факторы влияния.

#### Отбор предикторов.

Основой является статистическое уравнение множественной линейной регрессии вида:

$$y = b_1x_1 + \dots + b_nx_n + b_0 + \varepsilon, \quad (1)$$

где  $y$  — искомая функция уравнения;  $b_0$  — свободный член регрессионного уравнения;  $b_1, \dots, b_n$  — параметры регрессии;  $x_1, \dots, x_n$  — предикторы уравнения, которые в той или иной степени влияют на функцию отклика;  $\varepsilon$  — остатки, не описываемые уравнением регрессии [13].

Чтобы определить конкретный набор предикторов для каждого озера, можно использовать как метод включения переменных [13], так и поэтапный



регрессионный анализ. При любом подходе из всех моделей в качестве оптимальной выбирается та, у которой «стандартная ошибка модели минимальна или достаточна из физических соображений, коэффициент детерминации достаточно высок ( $R^2 > 0,6$ ), модель адекватна по  $F$ -критерию, а вероятность ошибки расчета ( $p$ -level) для всех коэффициентов регрессии (включая свободный член) меньше заданного уровня значимости». [14]. В работе применялся второй способ, так как стояла задача из базы данных всех доступных гидрометеорологических величин выявить те, которые будут являться статистически обоснованными предикторами. Регрессионный анализ осуществлялся в несколько этапов, которые кратко описаны ниже.

1. Построение корреляционной матрицы с целью поиска мультиколлинеарных факторов и оценка нагрузки этих факторов. Например, для оз. Верхнее Куйто мультиколлинеарными предикторами (с коэффициентами корреляции  $R > 0,7$ ) оказались температура воздуха  $T$  и температура точки росы  $Td$  ( $R = 0,97$ ); атмосферное давление на станции  $P_0$  и атмосферное давление на уровне моря  $P$  ( $R = 0,99$ ). Из пары мультиколлинеарных факторов исключается тот, у которого коэффициент регрессии  $\beta$ , полученный по стандартизированным данным, меньше. В нашем случае  $\beta_T = 1,21$ ;  $\beta_{Td} = -1,27$ ;  $\beta_{P_0} = -0,10$ ;  $\beta_P = 0,11$ . Следовательно, из анализа исключаются  $T$  и  $P_0$ .

2. Построение регрессионного уравнения для анализа значимости предикторов. Для этого по критерию Стьюдента проверяется условие  $p$ -значение  $< 0,05$ . Предикторы, для которых это условие не выполняется, исключаются из анализа. В нашем случае для рассматриваемого примера оз. Верхнее Куйто при первой итерации исключается скорость ветра  $Ff$  с  $p$ -значением  $= 0,23$  и давление на уровне моря  $P$  с  $p$ -значением  $= 0,46$ . Дополнительно проверялось условие значимости модели по  $F$ -критерию.

3. Анализ остатков уравнения регрессии. Строится частотная диаграмма, нормально-вероятностный график и диаграмма рассеяния. Это необходимо для понимания, что остатки распределены нормально и не зависят от предсказанных по уравнению регрессии значений отклика. На примере оз. Верхнее Куйто видно, что остатки распределены симметрично, а в соотношении остатков и предсказанных значений зависимости не наблюдается (см. рис. 2).

Перечисленные этапы позволяют отобрать статистически значимые предикторы. Результаты оценивания полученных регрессионных уравнений для рассматриваемых озер представлены в табл. 2. Для всех переменных в этих уравнениях выполняется условие  $p$ -level  $< 0,05$ . С формальной точки зрения, представленные уравнения являются оптимальными по статистическим критериям. Однако содержательного смысла в некоторых переменных нет. Например, в уравнении для оз. Верхнее Куйто переменные  $U$  и  $Def$  дают пренебрежимо малый вклад в коэффициент детерминации, при этом стандартная ошибка модели почти не уменьшается, поэтому оптимальным следует считать только уравнение с переменными  $H_{\text{пр}2}$  и  $H_{\text{пр}1}$ . Примерно такая же ситуация встречается и в других уравнениях. В табл. 2 такие переменные выделены скобками.

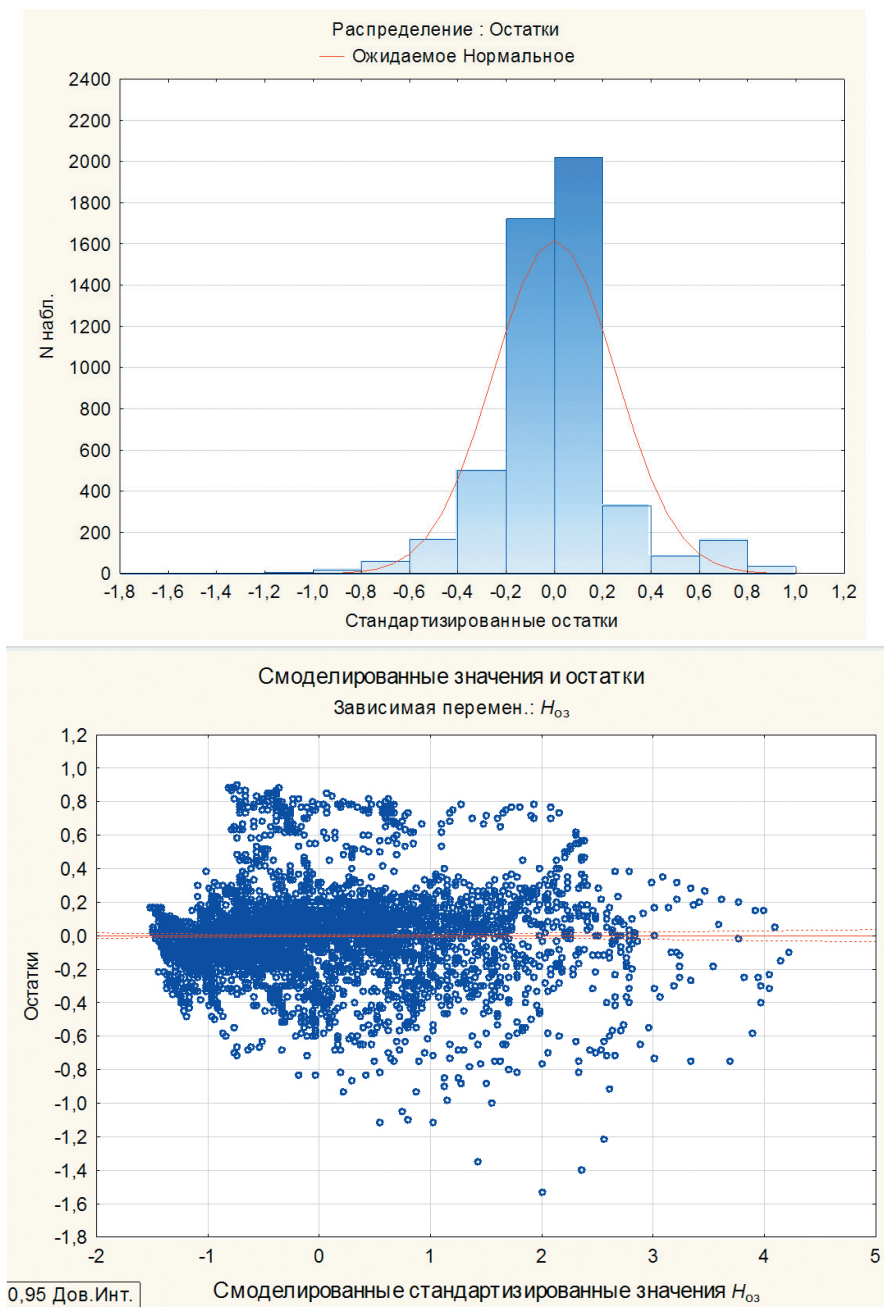


Рис. 2. Распределение остатков регрессионной модели, оз. Верхнее Куйто.

Fig. 2. Distribution of residuals of the regression model, Lake Verkhnee Kuito.

Таблица 2

Статистические оценки параметров стандартизированных регрессионных уравнений  
уровней воды исследуемых озер в зависимости  
от гидрометеорологических характеристик за 2008—2021 гг.

Statistical estimates of parameters of standardized regression  
equations of water levels of the studied lakes depending  
on hydrometeorological characteristics for 2008–2021

Дискретность	Предиктор	$R^2$	$\sigma$
Верхнее Куйто			
Сутки	$H_{пр2}$	0,902	0,312
	$H_{пр1}$	0,933	0,258
	( $U$ )	0,934	0,256
	( $Def$ )	0,936	0,253
Лексозеро			
Сутки	$H_{отг}$	0,919	0,284
	( $U$ )	0,920	0,282
	( $S$ )	0,920	0,282
Ведлозеро			
Месяц	$H_{отг}$	0,829	0,415
	$U$	0,849	0,392
	$S$	0,860	0,378
Сандал			
Месяц	$S$	0,213	0,889
	$H_{отг}$	0,357	0,807
	$Def$	0,383	0,792
	$U$	0,582	0,654
Суоярви			
Сутки	$H_{отг}$	0,814	0,432
	$S$	0,841	0,399
	( $U$ )	0,842	0,398
Пермусозеро			
Месяц	$U$	0,251	0,868
	$S$	0,419	0,766
	$H_{отг}$	0,516	0,702
Ловозеро			
Месяц	$H_{отг}$	0,883	0,342
	$H_{пр}$	0,907	0,306
	( $U$ )	0,911	0,300
Пулозеро			
Сутки	$H_{отг}$	0,914	0,292
	$S$	0,927	0,270
	( $U$ )	0,927	0,269



**Результаты исследования**

*Построение регрессионных моделей и оценка их эффективности.*

По приведенному выше алгоритму анализировалось каждое из исследуемых озер. В итоге получилось десять регрессионных уравнений для моделирования без временного сдвига в рядах предикторов. Уравнения построены по данным за период с 2008 г. по 2021 г. и апробированы на независимом материале за 2022 г. При построении уравнений использовались разные шаги дискретизации, выбор которых зависит от того, является ли озеро зарегулированным: если нет, то использовались суточные значения гидрометеорологических величин; если да, то данные обрабатывались в соответствии с типом зарегулированности озера (см. табл. 1). Для этого использовались среднемесячные значения переменных.

Регрессионные уравнения для стандартизированных данных приведены в табл. 3.

Таблица 3

Регрессионные уравнения для исследуемых озер  
Regression equations without lead time for the studied lakes

1	Лексозеро	
	Сутки	
	$H_{оз} = 0,96H_{отг} - 0,022U + 0,012S$	
2	Ведлозеро	
	Сутки	Месяц
	$H_{оз} = 0,88H_{отг} - 0,11S - 0,083U$	$H_{оз} = 0,91H_{отг} - 0,116U - 0,109S$
3	Сандал	
	Сутки	Месяц
	$H_{оз} = 0,60Def + 0,52U + 0,37H_{отг} - 0,22S$	$H_{оз} = 0,94Def + 0,82U + 0,38H_{отг} - 0,14S$
4	Суоярви	
	Сутки	
	$H_{оз} = 0,87H_{отг} - 0,16S - 0,011U$	
5	Верхнее Куйто	
	Сутки	
	$H_{оз} = 0,55H_{пр2} + 0,43H_{пр1} + 0,076U + 0,065Def$	
6	Лёкшмозеро	
	Сутки	
	$H_{оз} = -0,34S + 0,17H_{отг} - 0,035U + 0,027P_0$	
7	Ондозеро	
	Месяц	Год
	$H_{оз} = 0,56H_{отг} - 0,25U - 0,004T$	$H_{оз} = 0,60H_{отг} + 0,33U - 0,15T$
8	Пермусозеро	
	Сутки	
	$H_{оз} = -0,39S + 0,25H_{отг} - 0,24U$	
9	Ловозеро	
	Сутки	Месяц
	$H_{оз} = 0,84H_{отг} + 0,11H_{пр} - 0,07U$	$H_{оз} = 0,77H_{отг} + 0,18H_{пр} - 0,08U$

10	Пулозеро Сутки $H_{03} = 0,88H_{отт} - 0,13S - 0,01U$
----	---

Из табл. 2 и 3 можно увидеть, что наиболее часто предикторами в уравнениях являются уровень воды рек, впадающих в озера или вытекающих из них и относительная влажность воздуха. Данная характеристика имеет значимую корреляцию с интегральным влагосодержанием атмосферы [15], которое формирует облачность и соответственно выпадение осадков. В работе показано, что в двух случаях (Сандал и Верхнее Куйто) предиктором служит также дефицит насыщения водяного пара *Def*. Он выявлен путем описанного выше алгоритма и объяснить справедливость его применения, помимо соблюдения условий регрессионного анализа, можно фактом отсутствия у оз. Сандал и оз. Верхнее Куйто данных по вытекающим рекам. В одном случае (оз. Ондозеро) предиктором является температура воздуха *T*, которая в ходе регрессионного анализа вытеснила из ряда предикторов высоту снежного покрова *S*.

*Оценка эффективности.*

Полученные уравнения оценивались на эффективность по критериям:  $S/\sigma_{\Delta}$  (где *S* — среднеквадратическая погрешность,  $\sigma_{\Delta}$  — среднеквадратическое отклонение моделируемой величины с учетом шага дискретизации),  $S/\sigma$  (где  $\sigma$  — среднеквадратическое отклонение моделируемой величины относительно среднего значения) [16] и зарубежному критерию *NSE* (критерий Нэша—Сатклиффа). Также оценивалась обеспеченность метода *P* (%), которая определяется по формуле  $P = (n'/n) \times 100$ , (где *n'* — количество смоделированных значений с погрешностью, меньшей допустимой, *n* — количество всех смоделированных значений), коэффициент детерминации  $R^2$  и определялся наилучший возможный период заблаговременности, т. е. уравнения включали предикторы со сдвижкой по времени (для получения заблаговременности при моделировании).

В табл. 4—5 приведены значения перечисленных критериев эффективности для уравнений за расчетный период с 2008 г. по 2021 г. и на независимом периоде (2022 г.) с различной заблаговременностью. Стоит отметить, что для озер, которые не зарегулированы или имеют сезонное регулирование, в качестве наилучшего периода заблаговременности (с наивысшим значением  $R^2$  и *NSE*) был определен временной сдвиг  $\tau = 3$  суток. Для озер с годичным и многолетним регулированием информация в табл. 4—5 представлена для  $\tau = 0$  и 1 месяц.

Проанализируем табл. 4—5, подтвердив численные значения критериев эффективности графиками хода фактических и смоделированных уровней воды (см. рис. 3). Рассмотрим на примере озера Сандал с заблаговременностью  $\tau = 1$  месяц: функция отклика построенная за 2008–2021 гг. модели имеет умеренную прямую связь с обуславливающими ее предикторами,  $R^2 = 0,58$ ; критерий эффективности  $S/\sigma = 0,68$  и  $S/\sigma = 0,72$  для расчетного и независимого периода соответственно, что в обоих случаях удовлетворяет условию  $S/\sigma \leq 0,80$  при  $n \geq 25$ . Оценка критерия Нэша—Сатклиффа *NSE*, как и критерий  $S/\sigma$ , характеризует качество смоделированных величин и

изменяется в пределах от 0 до 1. Соответственно, если  $NSE = 1$ , то смоделированные значения идеально сопоставимы с фактическими, если  $NSE = 0$ , то это значит, что полученное уравнение характеризуется такой же способностью к моделированию, как и средние значения ряда, если  $NSE < 0$ , то вместо смоделированного значения лучше использовать среднее значение по ряду [17]. Для озера Сандал за период параметризации  $NSE = 0,53$ , а за поверочный период  $NSE = 0,48$ , что говорит о возможности применения полученного уравнения с целью моделирования уровня режима, что подтверждается и графически (см. рис. 3).

Таблица 4

Результаты оценки эффективности регрессионных уравнений за период с 2008 г. по 2021 г.

Results of assessing the effectiveness of regression equations for the period 2008–2021

Водный объект	Временной сдвиг $\tau$											
	3 суток				0 месяцев				1 месяц			
	$R^2$	$S/\sigma_{\Delta}$	$NSE$	$P, \%$	$R^2$	$S/\sigma$	$NSE$	$P, \%$	$R^2$	$S/\sigma$	$NSE$	$P, \%$
Лексозеро	0,95	1,83	0,95	33,3								
Ведлозеро	0,84	2,59	0,83	29,8								
Сандал					0,58	0,65	0,58	66,1	0,58	0,68	0,53	67,7
Суоярви	0,83	2,73	0,80	23,2								
Верхнее Куйто	0,96	1,28	0,96	54,5								
Лёкшмозеро	0,16	6,05	0,10	9,5								
Ондозеро					0,31	0,83	0,31	57,7				
Пермусозеро	0,32	3,10	0,27	20,3					0,32	0,83	0,32	63,5
Ловозеро	0,88	1,82	0,88	38,4	0,91	0,30	0,91	97,0				
Пулозеро	0,92	1,12	0,91	55,8					0,36	0,81	0,35	73,7

Таблица 5

Результаты оценки эффективности регрессионных уравнений на независимом периоде

Results of assessing the effectiveness of regression equations for the verification period

Водный объект	Временной сдвиг $\tau$								
	3 суток			0 месяцев			1 месяц		
	$S/\sigma_{\Delta}$	$NSE$	$P, \%$	$S/\sigma$	$NSE$	$P, \%$	$S/\sigma$	$NSE$	$P, \%$
Лексозеро	1,79	0,91	34,3						
Ведлозеро	2,47	0,86	17,7						
Сандал				0,64	0,59	75,0	0,72	0,48	45,5
Суоярви	2,34	0,87	21,3						
Верхнее Куйто	0,60	0,99	77,6						
Лёкшмозеро	11,69	-1,96	6,4						
Ондозеро				1,43	-1,05	25,0			
Пермусозеро	2,49	0,60	28,2				0,73	0,44	63,6
Ловозеро	1,81	0,90	29,8	0,28	0,92	100,0			
Пулозеро	1,10	0,92	51,9				0,80	0,36	72,7

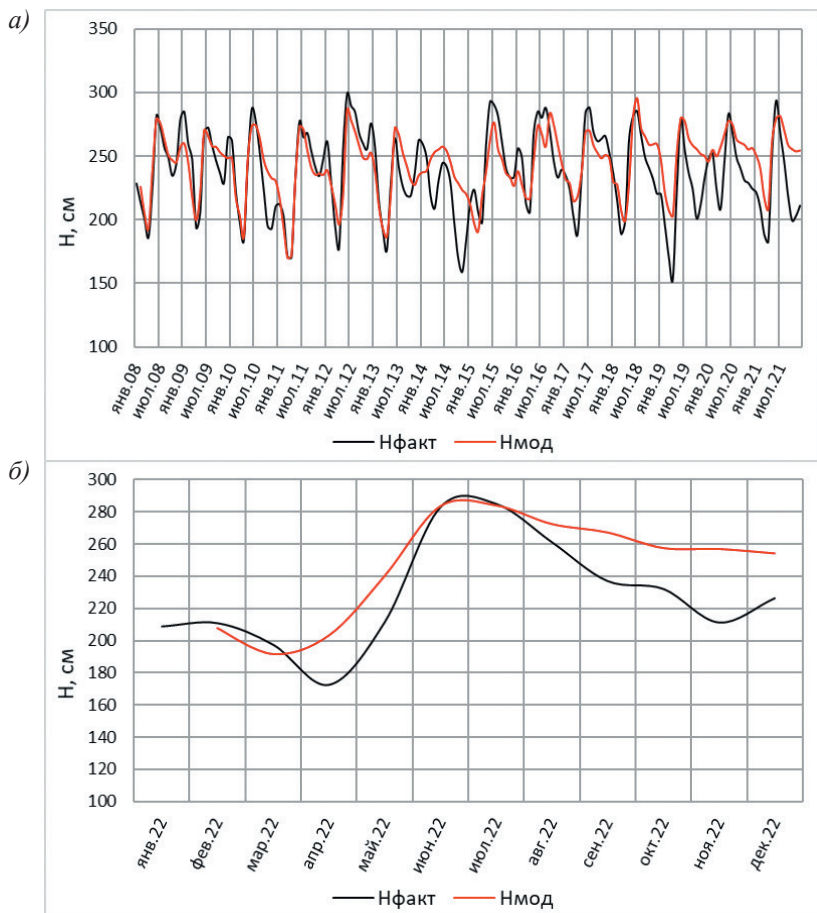


Рис. 3. График изменений фактических и смоделированных уровней воды оз. Сандал  
*a* — за расчетный период; *б* — на независимом периоде.

Fig. 3. Graph of changes in actual and simulated lake water levels Sandal  
*a* — for the calculated period; *b* — in the independent period.

На графиках видно, что смоделированные уровни в целом повторяют ход уровней фактических, улавливая пики, хотя в некоторых местах не захватывают минимальные значения.

### Заключение

Применение регрессионного анализа позволило выявить предикторы, которые влияют на уровеньный режим озер бассейнов Балтийского, Белого и Баренцева морей. Наиболее часто предикторами в уравнениях являются уровень воды рек, впадающих в озера или вытекающих из них и относительная влажность воздуха.

Определен наилучший период заблаговременности для моделирования уровней воды незарегулированных озер  $\tau = 3$  суток, при котором наблюдается наибольший коэффициент детерминации регрессионного уравнения.

Применение критериев эффективности к полученным моделям обозначило проблему использования рассматриваемых подходов. Целесообразно использовать критерии в комплексе и интерпретировать результаты в зависимости от поставленной задачи, опираясь также и на визуальное сопоставление результатов моделирования и фактического изменения рассматриваемой характеристики.

Результаты моделирования для ряда озер (например, Лёкшозеро) оказались действительно неудовлетворительными по всем критериям, из чего следует, что необходим пересмотр факторов, влияющих на функцию отклика, дискретности и расчетного периода.

### Список литературы

1. Лобанов В. А., Жильцова Е. Л., Лемешко Н. А. и др. Восстановление многолетних рядов температуры воздуха на европейской территории России // Метеорология и гидрология. 2005. №2. С. 5—14.
2. Лобанов В. А., Лобанова Е. В., Байков А. В. и др. Методы регионального моделирования в расчетах стока // Инженерные изыскания. 2011. №1. С. 70—77.
3. Сало Ю. А., Назарова Л. Е., Балаганский А. Ф. Расчет испаряемости и суммарного испарения с водосборов Северо-Запада России // Труды Карельского научного центра РАН. 2016. №9. С. 95—101.
4. Найденев В. И. Отчет о НИР № 96-05-65043. Российский фонд фундаментальных исследований. 1998.
5. Болгов М. В., Коробкина Е. А. О моделировании колебаний уровня озера Чаны для управления его гидрологическим режимом // Водное хозяйство России. 2012. №1. С. 4—21.
6. Нежиховский Р. А. Наводнения на реках и озерах. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 183 с.
7. Александров Б. М., Покровский В. В., Смирнов А. Ф., Урбан В. В. Озеро Лексозеро (Муезерский район, Республика Карелия). Рыбалка на Лексозере. Карта озера Лексозеро: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://vedlozero.ru/karelia/ozera-karelii/leksozero> (дата обращения: 25.08.2024).
8. Лексозеро (Лекш-озеро, Лекша, Льякса): [Электронный ресурс] / textual.ru // Государственный водный реестр / Минприроды России. 2009 (дата обращения 26.08.2024).
9. Ресурсы поверхностных вод СССР: Гидрологическая изученность. Т. 2. Карелия и Северо-Запад / под ред. Е. Н. Таракановой. Л.: Гидрометеиздат, 1965. 700 с.
10. Озеро Сандал. Продолжение дискуссии: [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://kondopoga.bezformata.com/listnews/ozero-sandal-prodolzhenie-diskussii/73984759/> (дата обращения: 18.09.2024).
11. Рыбальский Н. Г. и др. Государственный доклад «О состоянии и использовании водных ресурсов Российской Федерации в 2012 году». М.: НИА-Природа, 2013. 370 с.
12. Батмазова А. А., Гайдукова Е. В., Дрегваль М. С. Особенности построения регрессионной модели для оценки и прогноза уровня озера Ловозеро // Международный научно-исследовательский журнал. 2024. №7(145). С. 1—11. doi: 10.60797/IRJ.2024.145.67.
13. Малинин В. Н. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. СПб.: РГГМУ, 2008. 408 с.
14. Малинин В. Н., Гордеева С. М. Физико-статистический метод прогноза гидрологических характеристик (на примере Северо-Европейского бассейна). Мурманск: ПИНРО, 2003. 129 с.
15. Смирнов Н. П., Малинин В. Н. Водный баланс атмосферы как гидрологическая задача. Л.: Изд. ЛГУ, 1988. 200 с.
16. Георгиевский Ю. М., Шаночкин С. В. Гидрологические прогнозы. СПб.: РГГМУ, 2007. 436 с.

17. Сумачев А. Э. Оценка возможности прогнозирования максимального ледоходного уровня воды с использованием максимальной толщины льда на примере рек бассейна Северной Двины // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. №54. Научно-теоретический журнал. СПб: РГГМУ, 2019. С. 48—57.

### References

- Lobanov V. A., Zhiltsova E. L., Lemeshko N. A. et al. Reconstruction of long-term series of air temperature in the European territory of Russia. *Meteorologiya i gidrologiya = Meteorology and Hydrology*. 2005; (2): (5—14). (In Russ.).
- Lobanov V. A., Lobanova E. V., Baikov A. V. et al. Methods of regional modeling in runoff calculations. *Inzhenernie iziskaniya = Engineering surveys*. 2011; (1): (70—77). (In Russ.).
- Salo Yu. A., Nazarova L. E., Balagansky A. F. Calculation of evaporation and total evaporation from catchments in North-West Russia. *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Proceedings of the Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences*. 2016; (9): (95—101). (In Russ.).
- Naidenov V. I. Otchet o NIR №. 96-05-65043. Russian Foundation for Basic Research. 1998. (In Russ.).
- Bolgov M. V., Korobkina E. A. On modeling fluctuations in the level of Lake Chany to control its hydrological regime. *Vodnoe khozyaistvo Rossii = Water Management of Russia*. 2012; (1): (4—21). (In Russ.).
- Nezhikhovsky R. A. *Navodneniya na rekakh i ozerakh = Flooding of rivers and lakes*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988: 183 p. (In Russ.).
- Aleksandrov B. M., Pokrovsky V. V., Smirnov A. F., Urban V. V. Lake Leksozero (Muezersky District, Republic of Karelia). Fishing on Leksozero. Map of Lake Leksozero. Available at: <https://vedlozero.ru/karelia/ozera-karelii/leksozero> (accessed on: 25.08.2024). (In Russ.).
- Leksozero (Leksh-ozero, Leksha, Lyeksa). Available at: <https://textual.ru/gvr/index.php?card=153424> (accessed on: 26.08.2024). (In Russ.).
- Tarakanova E.N. *Resursi poverkhnostnikh vod SSSR. Gidrologicheskaya izuchennost'. T.2. Kareliya i Severo-Zapad = Surface Water Resources of the USSR: Hydrological Study. Vol. 2. Karelia and the North-West*. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1965; 700 p. (In Russ.).
- Lake Sandal. Discussion continued. Available at: <https://kondopoga.bezformata.com/listnews/ozero-sandal-prodolzhenie-diskussii/73984759/> (accessed on: 18.09.2024). (In Russ.).
- Rybalsky N. G. *Gosudarstvenny doklad «O sostoyanii i ispolzovanii vodnykh resursov Rossiiskoi Federatsii v 2012 godu» = State report «On the state and use of water resources of the Russian Federation in 2012»*. M.: NIA-Priroda, 2013: 370 p. (In Russ.).
- Batmazova A. A., Gaidukova E. V., Dregval M. S. Features of constructing a regression model for assessing and forecasting the level of Lake Lovozero. *Mezhdunarodnii nauchno-issledovatel'skii zhurnal = International scientific research journal*. 2024; 7(145):(1—11). (In Russ.). doi: 10.60797/IRJ.2024.145.67.
- Malinin V. N. *Statisticheskie metody analiza gidrometeorologicheskoi informatsii = Statistical methods of analysis of hydrometeorological information*. St. Petersburg, izd. RGGMU, 2008: 408 p. (In Russ.).
- Malinin V. N., Gordeeva S. M. *Fisiko-statisticheskii metod prognoza gidrologicheskikh kharakteristik (na primere Severo-Evropeiskogo basseina) = Physical-statistical method for forecasting hydrological characteristics (using the North European Basin as an example)*. Murmansk: PINRO, 2003: 129 p. (In Russ.).
- Smirnov N. P., Malinin V. N. *Vodnyy balans atmosfery kak gidrologicheskaya zadacha = Water balance of the atmosphere as a hydrological problem*. L.: Leningrad State University Press, 1988: 200 p. (In Russ.).
- Georgievsky Yu. M., Shanochkin S. V. *Gidrologicheskie prognozy = Hydrological forecasts*. St. Petersburg, izd. RGGMU, 2007: 436 p. (In Russ.).
- Sumachev A. E. Assessment of the possibility of predicting the maximum ice-flowing water level using the maximum ice thickness using the example of rivers in the Northern Dvina basin. *Uchyonye zapiski RGGMU = Scientific notes of the Russian State Hydrometeorological University*. 2019; (54): (48—57). (In Russ.).



### ***Информация об авторах***

*Батмазова Анна Александровна*, аспирант, ассистент кафедры инженерной гидрологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия, batmazovaa@mail.ru.

*Гайдукова Екатерина Владимировна*, кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой инженерной гидрологии, Российский государственный гидрометеорологический университет, Санкт-Петербург, Россия, oderiut@mail.ru.

### ***Information about authors***

*Batmazova Anna Aleksandrovna*, postgraduate student, assistant of the Department of Engineering Hydrology, Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia.

*Gaidukova Ekaterina Vladimirovna*, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Engineering Hydrology, Russian State Hydrometeorological University, St. Petersburg, Russia.

**Конфликт интересов:** конфликт интересов отсутствует.

*Статья поступила 29.09.2024*

*Принята после доработки в печать 22.02.2025*

*The article was received on 29.09.2024*

*The article was accepted after revision on 22.02.2025*