

УДК 556.5  
DOI 10.17513/use.38453

## ИДЕНТИФИКАЦИЯ КОМПОНЕНТОВ ФОРМИРОВАНИЯ СТОКА ИЛАССКОГО БОЛОТНОГО МАССИВА НА ОСНОВЕ ИЗОТОПНЫХ ДАННЫХ ( $\delta^{2\text{H}}$ – $\delta^{18\text{O}}$ )

<sup>1</sup>Лизунова М.А., <sup>1</sup>Яковлев Е.Ю., <sup>1</sup>Чупаков А.В., <sup>1</sup>Прасолов С.Д., <sup>2</sup>Токарев И.В.

<sup>1</sup>Федеральное государственное бюджетное учреждение науки

«Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН», Архангельск, Российская Федерация, e-mail: marigeo17@rambler.ru;

<sup>2</sup>Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования «Санкт-Петербургский государственный университет», Санкт-Петербург, Российская Федерация

Экосистемы верховых болот, занимающие значительную часть территории Северо-Запада России, являются важными маркерами изменения климатических характеристик. Ввиду этого возрастает актуальность оценки гидрологических параметров верховых болот и питающихся преимущественно болотными водами малых водотоков. Цель исследования – идентифицировать компоненты формирования стока Иласского болотного массива и его эволюцию на основании вариаций изотопных отношений воды в рамках гидрологического континуума «болото – малая река». Работы были проведены на характерном для территории Архангельской области болотном массиве, относящемся к верховым торфяникам южноприбелиорского типа. Выполнено опробование болотных вод на различных микроландшафтах, а также стоковых и подземных вод гидрологического континуума. Для оценки вклада различных по генезису вод в общий баланс континуума применен метод стабильных изотопов воды, заключающийся в изменении вариаций изотопного состава воды при ее сезонных переходах в различные фазы (замерзания, испарения, конденсации). Анализ изотопного состава проб выявил вариации значений  $\delta^{18\text{O}}$  и  $\delta^{2\text{H}}$  для каждого типа вод гидрологического континуума, что позволило идентифицировать специфику их образования и сезонные различия формирования стока, а также сравнить долю испарения и разгрузки болотных вод в общем гидрологическом цикле. Результаты исследования подтвердили формирование стока с массива преимущественно внутренними болотными водами, показав при этом дополнительный подток грунтовых вод за пределами болота.

**Ключевые слова:** болотные экосистемы, сток, изотопная гидрология, изотопы  $\delta^{2\text{H}}$  и  $\delta^{18\text{O}}$

## IDENTIFICATION OF RUNOFF COMPONENTS OF FORMATION OF THE ILAS BOG MASSIF BASED ON ISOTOPE DATA ( $\delta^{2\text{H}}$ – $\delta^{18\text{O}}$ )

<sup>1</sup>Lizunova M.A., <sup>1</sup>Yakovlev E.Yu., <sup>1</sup>Chupakov A.V., <sup>1</sup>Prasolov S.D., <sup>2</sup>Tokarev I.V.

<sup>1</sup>Federal State Budgetary Institution of Science “Federal Research Center for the Integrated Study of the Arctic named after Academician N.P. Laverov Ural Branch of the Russian Academy of Sciences”, Arkhangelsk, Russian Federation, e-mail: marigeo17@rambler.ru;

<sup>2</sup>Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education «St. Petersburg State University», St. Petersburg, Russian Federation

The ecosystems of the upland bogs, which occupy a significant part of the territory of the North-West of Russia, are important markers of climate change. In view of this, the relevance of assessing the hydrological parameters of upland bogs is increasing and small watercourses primarily sustained by bog drainage. The objective of this research is to identify the components contributing to the runoff of the Illassky bog massif and its evolution within the hydrological continuum of the bog – small river, based on variations in water isotopic ratios. The research was carried out on a bog massif, which is a typical swamp of the southern White-Sea type, common in the Arkhangelsk region. The bog's waters samples were collected from various micro-landscapes, as well as from runoff and groundwater across the entire hydrological continuum. To assess the contribution of waters of different origins to the overall balance of the continuum, the method of stable water isotopes has been used. This method involves measuring variations in the isotopic composition of water during its seasonal transitions into different phases (freezing, evaporation, and condensation). Analysis of the isotopic composition of samples revealed variations in values  $\delta^{18\text{O}}$  and  $\delta^{2\text{H}}$  for each type of water of the hydrological continuum, which allowed to identify the specificity of their generation and seasonal differences in runoff formation, as well as to compare the proportion of evaporation and discharge of bog's waters to the overall hydrological cycle. The results of the study confirmed the formation of runoff from the massif mainly by internal bog waters, with additional groundwater inflow outside the bog massif.

**Keywords:** bog ecosystems, runoff, isotope hydrology, isotopes  $\delta^{2\text{H}}$  и  $\delta^{18\text{O}}$

### Введение

В условиях изменяющегося климата важной задачей становится оценка гидрологического режима таких ключевых для севе-

ро-запада экосистем, как верховые болота. Выявлено [1; 2], что в ответ на изменения климатических характеристик могут трансформироваться гидрологические параметры

болотных массивов – уровни болотных вод, глубина промерзания, расход стока и т.п., что в свою очередь влияет на формирование стока малых водотоков, питающихся преимущественно болотными водами.

В последнее время для решения гидрологических задач все чаще применяют изотопный метод, позволяющий идентифицировать не только генезис вод, но и условия их формирования [3-5]. Метод основан на изменении изотопного состава воды в разных процессах гидрологического цикла. В результате испарения или замерзания воды происходит фракционирование молекул воды по изотопам кислорода и водорода. Ряд наблюдений за вариациями изотопных параметров позволяет составить более полную картину гидрологического режима изучаемых объектов и выделить различные компоненты стока: осадки, подземные и поверхностные воды и др.

В связи с этим для оценки компонентов стока и уточнения водного баланса был выбран близкорасположенный к г. Архангельску типовой для региона болотный массив Иласский, обеспеченный большим количеством гидрометеорологических наблюдений [6, с. 29; 7].

**Цель исследования:** идентифицировать компоненты формирования стока Иласского болотного массива (далее – ИБМ) и его эволюцию на основании вариаций изотопных отношений воды в рамках гидрологического континуума «болото – малая река».

## Материалы и методы исследования

Исследование проведено в Приморском районе Архангельской области на гидрологическом континууме ИБМ – река Черная, расположеннном в заболоченной части таежных лесов. Исследуемый болотный массив обладает площадью 89 км<sup>2</sup>, возраст приблизительно 10–11 тыс. лет, сложен торфами slabой степени разложения на всю глубину залежи, подстилается озерно-ледниковыми отложениями (глины, пески) [6, с. 29; 8]. Постледниковый рельеф территории привел к заболачиванию территории по суходольному типу, что предопределило морфологию болота и омбротрофный тип питания [9]. В пределах массива выделены центральное плато с грядово-мочажинным комплексом, краевой склон с системой гряд, мочажин и озерков, трансгрессионная окраина [3; 6, с. 30]. Принадлежность ИБМ к типовым для региона верховым болотам южноприбеломорского типа [10] послужила причиной выбора массива в качестве объекта исследования.

Отбор проб воды проводился в период с сентября 2022 года по декабрь 2023 включительно, с различной периодичностью с учётом смены гидрологических циклов. Точки опробования были выбраны с учетом различных физико-географических особенностей каждого типового комплекса как болотного массива, так и за его пределами (рис. 1), поскольку морфология верховых болот оказывает прямое влияние на их гидрологические параметры [10; 11].



Рис. 1. Схема точек отбора проб  
Примечание: составлено авторами

Внутренние болотные воды (на рисунках – ВБВ) отбирались из гидрологических скважин, находящихся на разных микроландшафтных комплексах болота: грядово-озерковый комплекс (точка РЗ 4), грядово-мочажинный комплекс (точка РЗ 3), переходная зона (точка РЗ 2), окрайка болота в лесной зоне (точка РЗ 1). Воды грядово-озерково-мочажинного комплекса (на рисунках – ГОМк) были представлены, соответственно, поверхностными водами мочажин и озер. Трансформацию болотного стока прослеживали на примере двух водотоков, берущих начало в окраине ИБМ: левого притока реки Черной (точки I2-1 – I2-4), пополняющегося с грядово-озерково-мочажинного комплекса, и правого (точки I1-1 – I1-4), формирующегося «подповерхностными» болотными водами, а также в результатеющей точке (I 1), где соединяются оба водотока, на расстоянии около трех километров после слияния. Как маркеры подземных вод (на рисунках - ПВ) исследованы грунтовые воды из скважины (точка S), пробуренной на глубину 5 м, и поселкового колодца (точка K), оборудованного на месте выхода напорных грунтовых вод путем самоизлива.

Пробы отбирались через мембранный фильтр с использованием стерильных шприцев и шприцевых насадок в герметично закрывающиеся пластиковые пробирки. До момента анализа пробы находились в холодильной камере. Изотопный состав воды измерен в Ресурсном центре «Рентгенодифракционные методы исследования» Научного парка СПбГУ на лазерном спектрометре Picarro L2130i. Использован стандарт VSMOW2. Аналитическая воспроизведимость измерений составила  $\pm 0.02\text{‰}$  для  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\pm 0.1\text{‰}$  для  $\delta^2\text{H}$ .

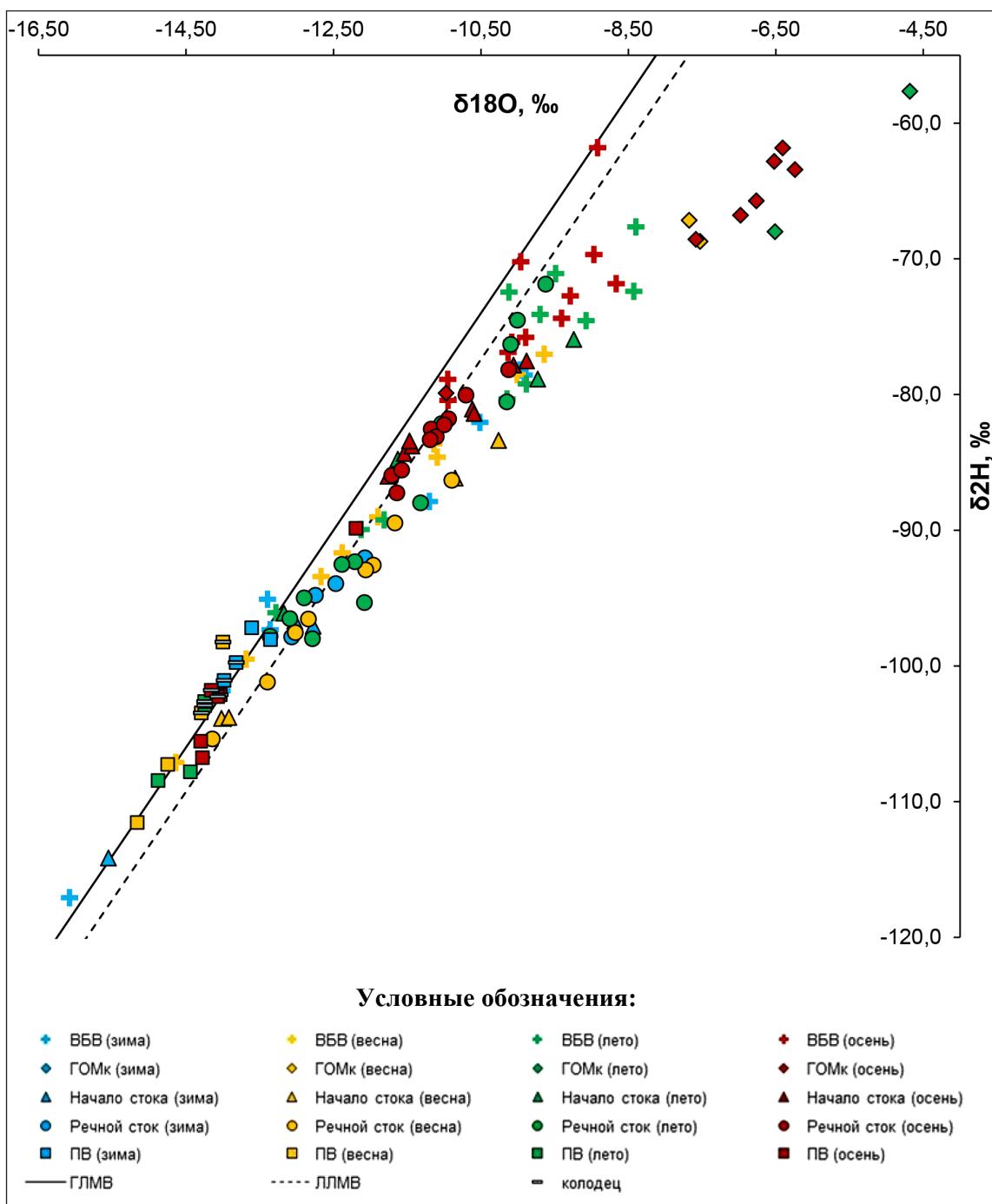
## Результаты исследования и их обсуждение

В основе метода изотопных индикаторов кислорода-18 идейтерия, примененного в данном исследовании и активно использующегося для решения различных задач [3; 5; 12] в гидрологии и климатологии, лежит постоянство общего количества стабильных изотопов  $\delta^2\text{H}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  в составе водных молекул при разнице их состава в водах различных фаз и генезиса. Существуют определенные закономерности накопления тяжелых или легких изотопов кислорода и водорода при фракционировании воды в результате ее перехода в различные фазы (испарение, конденсация, замерзания), хорошо описанные в работах [13, с. 275; 14, с. 15]. Таким образом, при нанесении результатов анализов на стандартную диаграмму распределения изотопов  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$ , становятся видны тренды различных типов вод, а по их отклонению или расположению вблизи прямой изотопного состава атмосферных осадков – Глобальной линии метеорных вод (здесь и далее – ГЛМВ), уравнение которой имеет вид  $\delta\text{D} = 8\delta^{18}\text{O} + 10$  [14, с. 23], – можно делать выводы о фракционировании воды, ее происхождении, возрасте и зависимости от различных факторов, таких как сезонность, географическая широта расположения объекта и высотность отбора проб [14, с. 21]. Для более точного анализа вод в различных широтах дополнительно принято использовать Локальную линию метеорных вод (здесь и далее – ЛЛМВ), которая отражает изотопный состав атмосферных осадков, характерных для того или иного климатического пояса и региона. Для Приморского района Архангельской области ЛЛМВ описана в [3] и использовалась для анализа в данном исследовании.

Максимальные и минимальные значения  $\delta^2\text{H}$  и  $\delta^{18}\text{O}$   
для разных типов исследуемых природных вод

| Тип исследуемых вод                            | $\delta^{18}\text{O}, \text{‰}$ |        | $\delta^2\text{H}, \text{‰}$ |        |
|--|---------------------------------|--------|------------------------------|--------|
|  | min                             | max    | min                          | max    |
| Подземные воды (гидрогеологическая скважина)   | -15.16                          | -12.19 | -111,5                       | -89,86 |
| Подземные воды (колодец)                       | -14.29                          | -13.82 | -103,47                      | -98,24 |
| Внутриболотные воды (гидрологические скважины) | -16.08                          | -8.4   | -117,1                       | -61,8  |
| Воды грядово-озерково-мочажинных комплексов    | -10.97                          | -4.68  | -79,9                        | -57,7  |
| Воды начала стока                              | -15.55                          | -9.24  | -114,2                       | -75,9  |
| Воды речного стока                             | -14.14                          | -9.62  | -105,4                       | -71,9  |

Примечание: составлено авторами на основе данных, полученных в процессе исследования.



*Rис. 2. Диаграмма соотношений  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$*   
Примечание: составлено авторами на основе данных, полученных в процессе исследования.

Результаты анализов на изотопный состав всех опробуемых типов вод, а также линии ГЛМВ и ЛЛМВ нанесены на диаграмму (рис. 2).

Распределение значений  $\delta^2\text{H}$  и  $\delta^{18}\text{O}$  разных по генезису типов вод отражено в таблице.

Опираясь на закономерности распределения значений  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  для различных

типов вод [13, с. 274] в вышеуказанных диапазонах и их положение по отношению к линиям ГЛМВ и ЛЛМВ, можно проследить изменения фракционирования вод в разные фазы гидрологического режима, а также выявить предполагаемые источники питания и разгрузки для каждого типа природных вод, описанных в исследовании.

Хорошо просматривается на диаграмме сезонная зависимость для внутриболотных и поверхностных вод, которая выражается в распределении результатов анализа данных проб вдоль линий метеорных вод и их широком диапазоне в течение года (согласно вышеуказанным вариациям). Так, пробы зимнего сезона расположены в так называемой зоне замерзания, характеризующейся «облегченным» составом изотопов. Выше по линии располагаются весенние пробы внутриболотных вод и речного стока (включая начало стока), постепенно «утяжеляясь», что говорит о преимущественном питании стока в весеннее половодье талыми водами. Наблюданная разница между расположением на диаграмме поверхностных вод начала стока (исток у болота) и стока в лесной зоне объясняется дополнительной подпиткой реки грунтовыми водами в лесной зоне за пределами болотного массива, что подтверждается натурными наблюдениями и показаниями pH [15-17]. Согласно полевым наблюдениям, значительное количество подземных вод поступает в правый приток реки Черная до точки отбора II-3 в неустановленном месте, что приводит к смешению изотопного состава и отображается на диаграмме – пробы речного стока имеют более «легкие» значения в сравнении с пробами начала стока.

В весенне-летний сезон внутренние болотные и поверхностные воды аппроксимируются к ЛЛМВ, что объясняется значительным вкладом дождевых осадков в их питание в этот период. Причем данные пробы сильнее «прижаты» к ЛЛМВ, чем к ГЛМВ, поскольку ЛЛМВ построена непосредственно по метеорным водам Северо-Западного региона [3]. Наиболее ярко выражена аппроксимация поверхностных вод к ЛЛМВ в осенний паводок – следы обильных дождевых осадков начала осеннего сезона. Внутриболотные воды с началом теплого периода и до наступления снежных осадков ведут себя на диаграмме отлично от поверхностных: анализы данных проб более «тяжелые» и начинают скапливаться в так называемой зоне испарения, где сконцентрированы все пробы грядово-озерково-мочажинного комплекса. Это говорит о значительном вкладе испарения в водный баланс болотного массива, даже через растительный покров, в среднем с мая по сентябрь. Преобладание в этой зоне проб грядово-озерково-мочажинного комплекса объясняется более интенсивным испарением с открытой поверхности застойных вод озерков и моч-

жин, чем из внутриболотных вод, поскольку специфика болотной растительности способствует удержанию влаги внутри деятельного слоя в засушливый период [9].

Иначе выглядит сезонная зависимость для грунтовых вод: так, на диаграмме наблюдается распределение результатов анализа вод из скважины вдоль ГЛМВ, но с гораздо меньшим диапазоном в отличие от поверхностных и внутриболотных вод. Также наблюдается «отставание» сезонной зависимости проб от описанных выше зависимостей для речных и внутриболотных вод. Все это объясняется питанием данного типа вод путем инфильтрации с учетом замедленного цикла водообмена. Однако результаты анализов колодезных вод практически не показывают сезонной зависимости, имеют наименьший из всех типов вод диапазон вариаций, сконцентрированы в одной зоне – сдвинуты немного влево от ГЛМВ. Учитывая, что колодец наполняется напорными водами более глубокого водоносного горизонта, а концентрация изотопов находится в зоне «легких» изотопов, можно предположить их постледниковое происхождение, поскольку перевес в сторону более легких изотопов накапливается за счет чередования циклов замерзания и испарения [14, с. 19]. Как уже обозначено выше, постледниковый рельеф территории оказывается на ее гидрологии, однако речные и болотные воды за счет преимущественно атмосферного питания постоянно обновляются, в то время как грунтовые воды имеют более долгий цикл водообмена и, как следствие, отличающийся от других типов вод изотопный состав. Также оба типа подземных вод приурочены к ГЛМВ, что объясняется меньшим влиянием на них атмосферных осадков, чем на поверхностные воды.

Также благодаря данному методу есть возможность идентифицировать компоненты стока ИБМ, дополняя полевые наблюдения. Воды болотного массива формируются преимущественно за счет атмосферных осадков, накапливаясь частично в теле болотной залежи (внутренние болотные воды), частично формируя застойные воды в локальных понижениях (мочажинах) и озерах, которые в летний сезон подвергаются интенсивному испарению. Вода, удерживаемая в теле болотной залежи, также подвергается фракционированию и смешению изотопного состава на протяжении сезона, но более медленно, в отличие от воды, стекающей из болота и образующей речной сток.

За пределами болотной залежи сток формируется из разных источников питания. Ручьи, вытекающие с болота, протекают сначала через окраину залежи и затем уходят в лесную зону по разным руслам. При этом пробы из левого притока (начало стока, точки I2-1 – I2-2) больше коррелируют с составом внутренних болотных вод, что отображается на диаграмме, в то время как пробы речного стока правого притока реки Черная (точки, II-3 и II-4), расположенные в лесной зоне, несколько отличаются по изотопному составу. Здесь к болотному питанию совместно с атмосферным добавляется питание грунтовыми водами – это заметно по расположению анализов проб вод речного стока на диаграмме и по дополнительным результатам полевых измерений [15-17].

Признаков участия грунтовых вод в питании болотного массива не наблюдается.

## Заключение

Анализ изотопного состава проб выявил характерные для каждого типа вод гидрологического континуума интервалы значений  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$ , что позволяет идентифицировать специфику их образования.

Установлено, что болотные воды имеют преимущественно атмосферное питание, средний изотопный состав внутренних болотных вод  $\delta^{18}\text{O} = -10,90\%$  и  $\delta^2\text{H} = -82,5\%$ , вод грядово-озерково-мочажинных комплексов  $\delta^{18}\text{O} = -7,08\%$  и  $\delta^2\text{H} = -66,40\%$ .

Установлена сезонная смена источников питания стоковых вод (метеорные воды в половодье и болотные воды в меженный период), средний изотопный состав стоковых вод  $\delta^{18}\text{O} = -11,73\text{\textperthousand}$  и  $\delta^2\text{H} = -88,55\text{\textperthousand}$ , выявлено дополнительное питание реки Черная грунтовыми водами за пределами болотного массива.

Не обнаружено явной связи между водоносными горизонтами грунтовых и болотных вод. Средний изотопный состав подземных вод  $\delta^{18}\text{O} = -14,11\%$  и  $\delta^2\text{H} = -102,59\%$ .

В процессе исследования изотопные данные дополнili результаты полевых наблюдений и подтвердили формирование стока с массива преимущественно внутренними болотными водами, показав при этом дополнительный подток грунтовых вод уже за пределами болота. При помощи распределения изотопов в разных зонах диаграммы удалось оценить вклад испарения и разгрузки болотных вод в общем гидрологическом цикле.

Использованный метод позволяет на качественном уровне оценивать соотношение

того или иного типов питания поверхностных вод, при отсутствии данных классических гидрологических наблюдений на водном объекте. В связи с этим полученные данные необходимы при интерпретации элементного состава поверхностных вод и для дальнейших выводов об экологическом состоянии водного объекта. Таким образом, результаты исследования могут быть использованы для оценки и контроля геэкологического состояния территории.

## Список литературы

1. Батуев В.И., Каложный И.Л. Анализ факторов, определяющих многолетнее изменение стока с олиготрофных болот // Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2020. № 6. С. 28–46. URL: <https://waterjournal.ru/article/211?ysclid=mh0g28stn0344568391> (дата обращения: 29.05.2024). DOI: 10.35567/1999-4508-2020-6-2.
  2. Скороспехова Т.В., Журавлева А.Д. Трансформация водного режима верховых болот в условиях изменения климата на примере Северо-Западного региона // Гидросфера. Опасные процессы и явления. 2024. Т. 6. № 3. С. 299–313. URL: <https://hydro-sphere.ru/index.php/hydrosphere/article/view/236> (дата обращения: 22.08.2025). DOI: 10.34753/HS.2024.6.3.299.
  3. Malov A., Pokrovsky O., Chupakov A. Using stable isotopes to assess river water dynamics and groundwater input in the largest European Arctic river (Severnaya Dvina) // Environmental Monitoring and Assessment. 2020. Vol. 192. №. 7. P. 444. URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10661-020-08414-y> (дата обращения: 23.03.2025). DOI: 10.1007/s10661-020-08414-y.
  4. Лизунова М.А., Селянина С.Б. Основные особенности гидрологии и гидрохимии верховых болот на примере Иласского болотного массива // II Лавёровские чтения Арктика: актуальные проблемы и вызовы: Сборник научных материалов Всероссийской конференции с международным участием (Архангельск, 13–17 ноября 2023 года). Архангельск: ООО «Типография № 2», 2023. С. 256–257. URL: <http://arhsc.uran.ru/conf23> (дата обращения: 20.08.2025).
  5. Прасолов Э.М., Строганова Т.А. Изотопный состав грунтовых и поверхностных вод болотного массива Ламмин-Сую (Ленинградская область) // Региональная геология и металлогения. 2019. № 77. С. 20–26. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/isotopnyy-sostav-gruntovnyh-i-poverhnostnyh-vod-bo-lotno-gos-massiva-lammin-suo-leningradskaya-oblast?ysclid=mgy-6dzyue3656092289> (дата обращения: 25.08.2025).
  6. Многолетние изменения элементов водного баланса на воднобалансовых и болотных станциях / Под ред. М.Л. Маркова. СПб.: Риал, 2021. 202 с. URL: [old2.hydrology.ru/ru/izdaniya\\_ggi\\_New](http://old2.hydrology.ru/ru/izdaniya_ggi_New) (дата обращения: 25.05.2025). ISBN 978-5-907276-34-5.
  7. Батуев В.И., Каложный И.Л. Особенности промерзания болот при климатических изменениях на севере и северо-западе Европейской территории России // Лёд и снег. 2019. Т. 59. № 2. С. 233–244. URL: <https://ice-snow.igras.ru/jour/article/view/564?ysclid=mh0gwmftva2470264> (дата обращения: 26.07.2025). DOI: 10.15356/2076-6734-2019-2-390.
  8. Шечченко В.П. Кузнецов О.Л., Политова Н.В. Зарецкая Н.Е., Кутенков С.А., Лисицын А.П., Покровский О.С. Поступление микрозлементов из атмосферы, зарегистрированное в природном архиве (на примере Иласского верхового болота, водосбор Белого моря) // Доклады Академии наук. 2015. Т. 465. № 5. С. 587. URL: [resources.krc.karelia.ru/library/doc/articles2010-2015/dan\\_2015\\_465.pdf](http://resources.krc.karelia.ru/library/doc/articles2010-2015/dan_2015_465.pdf) (дата обращения: 13.07.2023). DOI: 10.7868/S0869565215350200.

9. Пономарева Т.И. Влияние лесоосушения на лесорас-  
тительные условия сосновых кустарничково-сфагновых севе-

- ротаежного района Архангельской области: дис. ... канд. с.-х. наук. Архангельск, 2022. 180 с. URL: <https://narfu.ru/upload/iblock/5b6/avtoreferat.pdf?ysclid=mgy7ujnh1836374305> (дата обращения: 20.04.2025).
10. Юрковская Т.К. Болота Архангельской области: ботанико-географические особенности и динамическое состояние // IX Галкинские Чтения: Материалы конференции (Санкт-Петербург, 05–07 февраля 2018 года). СПб.: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2018. С. 243–246. URL: <https://www.binran.ru/science/publikatsii/materialy-konferentsiy/galkinskie-chteniya> (дата обращения: 29.07.2025).
11. Панов В.В. Основные аспекты морфологии болот // XIII Галкинские Чтения: Материалы конференции (Санкт-Петербург, 9–10 апреля 2025 года). СПб.: Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина), 2025. С. 6–17. URL: <https://www.binran.ru/science/publikatsii/materialy-konferentsiy/galkinskie-chteniya> (дата обращения: 30.07.2025).
12. Токарев И.В., Яковлев Е.Ю., Бородулина Г.С. Климатические причины происхождения ураганных неравновесных отношений  $^{234}\text{U}/^{238}\text{U}$  в подземных водах северо-Запада России // Рельеф и четвертичные образования Арктики, Субарктики и Северо-запада России. 2024. № 11. С. 678–689. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/klimaticheskie-prichiny-proishozhdeniya-uragannyyh-neravnovesnyh-otnosheniy-u-i-v-podzemnyh-vodah-severo-zapada-rossii?ysclid=mh0gplli4i966122030> (дата обращения: 20.08.2025). DOI: 10.24412/2687-1092-2024-11-678-689.
13. Гидрометеорологический режим и водный баланс верховых болот Северо-Запада России (на примере Ламмин-Суо) / Под ред. С.М. Новикова, В.И. Батуева. СПб., 2019. 448 с. URL: <https://hydrology.ru/gidrometeoro- logiceskii-rezim-i-vodnyi-balans-verkhovuyx-bolot-severo-zapada-rossii-na-primore-bolota-lammin-suo> (дата обращения: 20.09.2025). ISBN 978-5-4386-1701-3.
14. Екаикин А.А. Стабильные изотопы воды в гляциологии и палеогеографии / Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации и др. СПб., 2016. 63 с. URL: [https://mgmtmo.ru/edumat/polar/Ekaikin\\_2016.pdf?ysclid=mh0ke2bk4c707826856](https://mgmtmo.ru/edumat/polar/Ekaikin_2016.pdf?ysclid=mh0ke2bk4c707826856) (дата обращения: 06.09.2025). ISBN: 978-5-98364-076-4.
15. Биогеохимия углерода и сопряженных микроэлементов в экосистемах торфяных болот Северо-Запада России в гидрологическом континууме: отчет о НИР / С. Б. Селянина и др. Архангельск: ФИЦКИА РАН, 2024. 52 с. URL: <https://rsef.ru/project/22-17-00253/?ysclid=mgy96v8u1v605351803> (дата обращения: 10.09.2025).
16. Чупаков А.В., Забелина С.А., Прасолов С.Д., Чупакова А.А., Прилуцкая Н.С., Шпанов Д.А., Селянина С.Б., Широкова Л.С. Суточная динамика гидрохимических показателей в гидрологическом континууме Илласского болотного массива // Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами: Материалы V Всероссийской научной конференции с международным участием имени профессора С.Л. Шварцева (Томск, 16–21 октября 2023 года). Томск: Национальный исследовательский Томский политехнический университет, 2023. С. 213–216. URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=55322535&ysclid=mgy9awuu722224072> (дата обращения: 15.09.2025).
17. Трудова Н.С., Мухортина Н.А., Чупаков А.В. Широкова Л.С., Иванова И.С. Распределение полициклических ароматических углеводородов в водах Илласского болотного массива в весенне-летний период // III Юдахинские чтения: сборник научных материалов (Архангельск, 25–28 июня 2024 года). Архангельск: КИРА, 2024. С. 191–195. URL: <https://yudakhin.fciarctic.uran.ru> (дата обращения: 15.09.2025).

**Конфликт интересов:** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest:** The authors declare that there is no conflict of interest.

**Финансирование:** Исследование выполнено в рамках темы ФНИР «Особенности миграции элементов и их изотопов в компонентах окружающей среды Западного сектора Российской Арктики в условиях климатических и техногенных изменений», № государственной регистрации 125022002727-2.

**Financing:** The research was carried out within the framework of the FNR topic “Features of migration of elements and their isotopes in the environmental components of the Western sector of the Russian Arctic in the context of climatic and man-made changes, state registration no. 125022002727-2.