

DOI: <https://doi.org/10.37162/2618-9631-2024-4-128-145>

УДК 556.06+556.5.072+556.56(470.2)

**Оценка изменений гидрологического режима
верхового болота с учетом
ожидаемых изменений климата в период до 2060 года
(на примере болота Ламмин-Суо)**

А.Д. Журавлева, Л.С. Курочкина, Т.В. Скороспехова

*Государственный гидрологический институт, г. Санкт-Петербург, Россия
a.d.zhuravleva@gmail.com*

Проведена оценка ожидаемых изменений гидрологического режима типичного верхового болота Северо-Запада России с учетом различных климатических сценариев. Объектом исследования является верховое болото Ламмин-Суо (Ленинградская область), на котором с 1950 года ведутся регулярные метеорологические и гидрологические наблюдения. В рамках исследования процесса формирования стока с болота использовалась концептуальная гидрологическая модель HBV. Учет возможных изменений климата в рассматриваемом регионе проводился по данным климатического моделирования проекта CMIP6. Результаты работы представлены в виде расчетов по двум сценариям социально-экономического развития: SSP2-4.5 и SSP5-8.5. На основе смоделированных данных об объемах стока с верхового болота произведена оценка его уровня режима до 2060 года, а также дан прогноз связанных с ним изменений болотных микроландшафтов.

Ключевые слова: верховые болота, моделирование стока, климатический прогноз, изменение климата, болотные микроландшафты

**Assessment of changes in the hydrological regime
of a raised bog under conditions
of expected climate change during the period until 2060:
A case study for the Lammin-Suo bog**

A.D. Zhuravleva, L.S. Kurochkina, T.V. Skorospekhova

*State Hydrological Institute, Saint-Petersburg, Russia
a.d.zhuravleva@gmail.com*

The paper assesses expected changes in the hydrological regime of a typical raised bog in Northwestern Russia, taking into account various climatic scenarios. The object of the study is the Lammin-Suo raised bog (the Leningrad region), where routine meteorological and hydrological observations have been carried out since 1950. The HBV conceptual hydrological model was used in studying the process of formation of runoff from the bog. For taking into account expected climate change in the region, an analysis based on the results of the CMIP6 climate modeling project was carried out. Calculations are presented for two scenarios of socioeconomic development: SSP2-4.5 and SSP5-8.5. Based on simulated data on the volume of runoff from the raised bog, its level regime was assessed until 2060, and a forecast of related changes in bog microlandscapes was given.

Keywords: raised bog, runoff modeling, climate forecast, climate change, bog microlandscapes

Введение

В результате климатических изменений болотные экосистемы претерпевают активную трансформацию [22]. Главным образом эти изменения отражаются на уровне и стоке болотных вод, что в дальнейшем влияет на состав растительности на болоте [21]. Особенно заметны изменения в растительном покрове верховых болот Северной Европы, где все чаще фиксируется увеличение доли древесных видов [17]. Изменения климата и естественные процессы трансформации ландшафтов влияют на торфяные болота, вызывая нестабильность в их гидрологическом режиме. Одной из ключевых задач является определение моментов резких изменений в рядах гидрометеорологических данных, т. н. «точек перелома», где состояние процесса меняется [2]. Для этого необходимы ряды данных, продолжительность которых достаточна для того, чтобы оценить изменчивость гидрологического режима в условиях изменяющегося климата.

В представленном исследовании использовались данные гидрометеорологических наблюдений на болотном массиве Ламмин-Суо за период с 1950 по 2021 год. Эти данные позволяют провести надежное сравнение тенденций осадков, температуры и стока [26]. Моделирование климатических и гидрологических процессов позволяет оценить изменчивость гидрологического режима болот и оценить их реакцию на изменения климата в перспективе. Для прогнозирования ожидаемых изменений были использованы сценарии SSP2-4.5 и SSP5-8.5 проекта CMIP6. Эти сценарии описывают различные пути развития мировой экономики, социальных структур и потребления энергии. SSP2-4.5 представляет перспективу с умеренным экономическим ростом и снижением выбросов парниковых газов, в то время как SSP5-8.5 описывает быстрый экономический рост и значительные выбросы парниковых газов, основанные на использовании ископаемого топлива [19].

Целью данного исследования является оценка гидрологического режима верхового болота в условиях меняющегося климата и прогноз ландшафтных изменений на основе анализа взаимосвязи уровня болотных вод и расхода воды.

1. Материалы и методы

1.1. Объект исследования

Болото Ламмин-Суо расположено на Северо-Западе России, на Карельском перешейке, в 8 км от г. Зеленогорск (60.243541° с. ш, 29.815533° в. д.). Это олиготрофное (верховое) болото, типичное для Карельского перешейка, заболоченность рассматриваемого района составляет 23 % [3]. Болото Ламмин-Суо относится к резковыпуклым болотным массивам [4], которые являются наиболее распространенными на Северо-Западе России [11].

Болото Ламмин-Суо сформировалось в межкамовой котловине более 7 тысяч лет назад. Длина болотного массива составляет 2 км, ширина – около

1 км, общая площадь равна 2 км². Купол болота возвышается над его окрайками на 2,5–3 метра. Растительность меняется от центра болота к его краям в соответствии с направлением стока воды (рис. 1).

Основным источником влаги на болоте являются атмосферные осадки. Помимо этого, вода поступает на болото за счет склонового стока с камово-озовой гряды, находящейся на северо-западной окрайке болота. Сток воды с болота происходит через четыре постоянных и два временных ручья.

С 1950 года на болоте Ламмин-Суо работает экспериментальная болотная станция Государственного гидрологического института, основной задачей которой является изучение водного режим верхового болота. Для этого на болоте и прилегающем суходоле проводятся непрерывные наблюдения за метеорологическими параметрами, а также за элементами водного баланса (испарение, уровень болотных вод, сток болотных ручьев) [1].

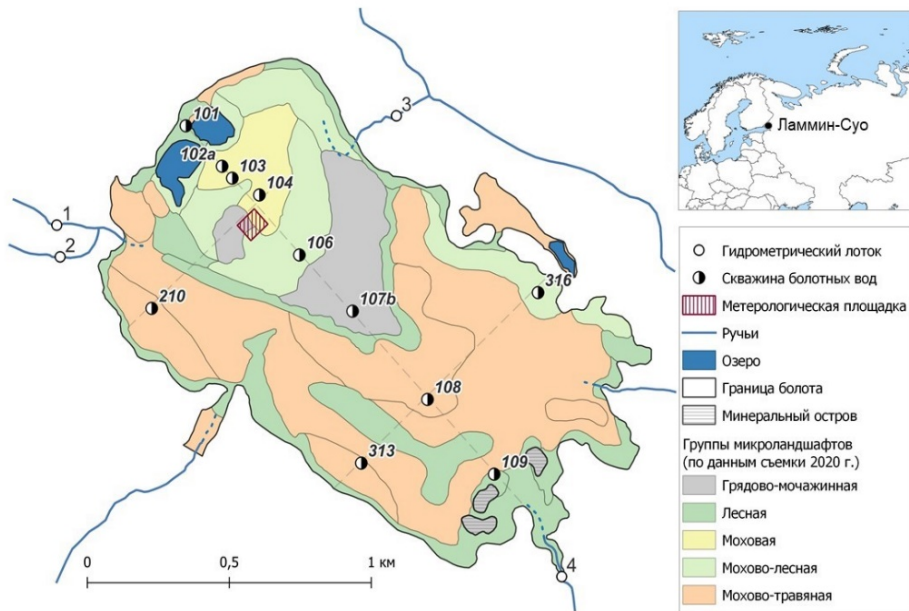


Рис. 1. Расположение пунктов наблюдения на болоте Ламмин-Суо.

Fig. 1. Location of observation points in the Lammin-Suo mire.

1.2. Климатическая модель

Оценка будущих изменений климата для исследуемой территории была выполнена на основе данных климатического моделирования проекта CMIP6 (CoupledModelIntercomparisonProjectPhase 6) [19]. Расчеты проводились по двум сценариям социально-экономического развития SSP2-4.5 и SSP5-8.5.

Сценарий SSP2-4.5 (SharedSocioeconomicPathway 2-4.5) представляет собой умеренный сценарий, в котором мировое общество предпринимает меры

по смягчению изменения климата. По данному сценарию уровень концентрации парниковых газов к 2100 году будет соответствовать 450 мг/л. Сценарий SSP5-8.5 (SharedSocioeconomicPathway 5-8.5), напротив, представляет собой экстремальный сценарий, где отсутствуют стратегии ограничения выбросов парниковых газов, что в итоге приводит к уровню концентрации парниковых газов 1260 мг/л к 2100 году.

Для оценки изменений климата были использованы средние значения ежемесячных температур воздуха и количества осадков. Во избежание систематических ошибок, возникающих в связи с использованием нескольких климатических моделей, вместо абсолютных значений оценивались относительные отклонения климатических характеристик от базового исторического периода 1995–2014 гг. Исходные метеорологические данные за исторический период были скорректированы с использованием метода «deltachange» [24] на величины полученных значений отклонений метеопараметров за каждый месяц. Метод «deltachange» позволяет избежать ошибок, присущих климатическим моделям, он предполагает перенос временной динамики исторического периода на будущее и, таким образом, не учитывает потенциальные будущие изменения в динамике климата, например, количество сухих и влажных дней [18].

Для получения месячных отклонений климатических характеристик использовались данные ансамбля из 33 глобальных климатических моделей. Месячные отклонения рассчитаны от базового исторического периода 1995–2014 гг. для двух будущих периодов: 2021–2040 и 2041–2060 гг. [20]. Для обобщения результатов по ансамблю моделей применялась медиана.

1.2. Методы определения точек перелома в рядах данных

Для определения отклонения гидрометеорологических временных рядов от однородности были выбраны три метода: тест Петтитта (PT) [23], стандартный тест на нормальную однородность (SNHT) [14], тест на диапазон Буйшанда (BR) [16]. Эти три теста могут определить год, в котором однородность набора данных была нарушена. В то время как тест SNHT выявляет разрывы в начале и конце временного ряда, два других теста более чувствительны к обнаружению разрывов в середине временного ряда. Тесты SNHT и BR предполагают, что данные имеют нормальное распределение. PT не требует этого допущения, поскольку является непараметрическим ранговым тестом и подвержен меньшему влиянию к выбросам [25]. Все три теста предполагают в соответствии с нулевой гипотезой, что годовые значения Y_i тестируемой переменной Y независимы и одинаково распределены. В соответствии с альтернативной гипотезой, тесты SNHT, Буйшанда и Петтитта предполагают, что имеет место постепенное изменение среднего значения (перелом). Эти три теста позволяют определить год, в котором вероятен перелом.

При определении точек изменения в рядах гидрометеорологических характеристик был принят следующий метод [5, 25]:

1. Точка изменения не обнаружена: серия гидрометеорологических данных может рассматриваться как однородная, когда один или не один из тестов отвергает нулевую гипотезу на значимом уровне 5 %.

2. Точка изменения обнаружена: ряды гидрометеорологических данных могут иметь сдвиг (точку изменения) или быть неоднородными, когда два или три теста отклоняют нулевое значение на значимом уровне 5 %.

3. Сомнительный ряд: при значимом уровне 5 % ряд гидрометеорологических данных считается сомнительным, когда три теста показывают разные результаты.

1.3. Гидрологическая модель

Оценка стока воды с верхового болота Ламмин-Суо была выполнена с использованием водно-балансовой концептуальной модели HBV, реализованной в программе HBV-light 4.0.0.16 [15]. Модель HBV воспроизводит сток воды с водосбора посредством расчетов накопления и таяния снега, влажности почвы, подземных вод и времени добегания [15]. Параметры модели назначаются вручную или с помощью встроенных алгоритмов, исходя из лучших показателей качества (коэффициент Нэша – Саттклифа, критерий Клинга – Гупты, коэффициент детерминации) [6].

Для расчетов использовались ежедневные данные о температуре воздуха и осадках, а также значения потенциальной эвапотранспирации, полученные на основе измерений на болотной станции. Проверочные данные включали ежедневные расходы воды в замыкающих створах на четырех болотных ручьях (ручьи Южный, Северный, Западный 1 и 2). Калибровка и верификация модели HBV для болота Ламмин-Суо проводились за последний квазистационарный период, выделенный на основе анализа однородности гидрометеорологических рядов. Оценка ожидаемых изменений стока с болота за период с 2021 по 2060 год выполнялась на основе установленных значений параметров модели за квазистационарный период и данных климатического моделирования.

1.4. Оценка уровня режима

Анализ уровня режима болотных вод основывался на существующей связи между болотными микроландшафтами и средним годовым положением болотных вод относительно поверхности. Для верховых болот Северо-Западного региона России эта связь была обнаружена и подробно изучена Е.А. Романовой [10] и К.Е. Ивановым [8] во второй половине XX века. Согласно установленным взаимосвязям водного режима и болотной растительности, наименее увлажненные участки, как правило, занимают микроландшафты лесной группы, а на наиболее влажных участках располагаются мохово-травяные и травяные группы.

Наличие продолжительного ряда наблюдений (1950–2021 гг.) за уровнями болотных вод и периодически проводившихся геоботанических описаний

растительности на болоте Ламмин-Суо позволили определить характерные средние уровни болотных вод для пяти групп микроландшафтов олиготрофных болот. Помимо этого, на тех скважинах, где произошла смена микроландшафта, был произведен дополнительный анализ критических отметок уровней, при которых происходит смена растительности.

Анализ средних многолетних уровней болотных вод (УБВ) на пяти группах микроландшафтов показал, что они могут быть разделены на три категории: 1) с высоким уровнем болотных вод (УБВ от 13 до 14 см ниже поверхности болота) представлены грядово-мочажинным комплексом и мохово-травяной группой; 2) со средним уровнем болотных вод (УБВ составляет 22 см ниже поверхности) – мохово-лесная и моховая группа; 3) с низким уровнем болотных вод (УБВ 39 см ниже поверхности) – лесная группа.

Средние многолетние УБВ, наблюдавшиеся на разных микроландшафтах болота Ламмин-Суо были сопоставлены с характерными уровнями олиготрофных болот Северо-Запада России. Сравнение показало, что средние уровни болотных вод на болоте Ламмин-Суо и уровни, приведенные в [8–10, 13], имели схожие значения для мохово-лесной, моховой, мохово-травяной и грядово-мочажинной групп (табл. 1).

Таблица 1. Среднегодовые уровни болотных вод (см) на разных типах микроландшафтов по данным наблюдений на болоте Ламмин-Суо (1950-2021 гг.) и литературных источников

Table 1. Average annual peatland water levels (cm) on different types of micro-landscapes according to observations in the Lammin-Suo peatland (1950-2021) and literary sources

Микроландшафт	Болото Ламмин-Суо		Иванов К.Е., 1957 [8]	Романова Е.А., 1960 [10]	Методические указания	
	средне-годовые	вегетационный период*			1971 [13]	2011 [9]
Лесной	-23 ÷ -64	-18 ÷ -59	-30 ÷ -37	-30 ÷ -45	-40 ÷ -46	-45
Мохово-лесной	-17 ÷ -46	-13 ÷ -40	–	-30 ÷ -45	–	-28
Моховой	-24 ÷ -33	-20 ÷ -28	-23 ÷ -30	-15 ÷ -30	-33 – -34	-22 ÷ -24
Мохово-травяной	-13 ÷ -25	-8 ÷ -20	-10 ÷ -16	-5 ÷ -15	–	-19
Грядово-мочажинный комплекс	-15 ÷ -20	-11 ÷ -15	-9 ÷ -20	-5 ÷ -30	-24 ÷ -32	-21 ÷ -29

Примечание. *Так как из литературных данных не всегда можно понять, за какой период проведено осреднение (год и вегетационный период), для болота Ламмин-Суо средние значения уровней болотных вод были рассчитаны для двух периодов.

Для лесной группы амплитуда колебания уровней болотных вод на болоте Ламмин-Суо была значительно выше, измеренные уровни опускались на 18–27 см ниже литературных данных. Такое расхождение может быть объяснено тем, что данные литературных источников основаны на коротких рядах наблюдений стационарного климатического периода (1951–1971 гг.), тогда как наблюдения на болоте Ламмин-Суо охватывают более продолжительный промежуток времени, включая период климатических изменений.

Анализ многолетней и внутригодовой изменчивости уровней болотных вод был выполнен на основе выделенных для каждой их скважин точек перелома, определяющих квазистационарные периоды. Далее полученные периоды сравнивались между собой по среднегодовому и среднемесячным значениям УБВ.

2. Результаты

2.1. Точки перелома в рядах данных

Анализ однородности и определение точек перелома были выполнены для среднегодовых значений температуры воздуха, осадков, стока ручьев и уровней болотных вод за период с 1950 по 2021 год. Учитывая длительность наблюдений (более 70 лет), была выдвинута гипотеза о существовании более одной точки перелома в рядах гидрометеорологических характеристик на болоте Ламмин-Суо. Таким образом, сначала проводился анализ однородности для временных рядов за полный период наблюдений (с 1950 по 2021 год), а затем, при обнаружении точки перелома, ряд анализировался с года, в котором было зафиксировано нарушение однородности до 2021 г. [5]. Тесты на однородность показали наличие точек перелома во всех гидрометеорологических рядах в 1970–1980-е годы (рис. 2).

В рядах данных годовых сумм атмосферных осадков, стока с болотного массива, а также уровней болотных вод в центральной части болотного массива Ламмин-Суо (скв. 103, 104) точка перелома обнаружена в 1978 году. Нарушение однородности в ряде данных среднегодовой температуры воздуха было зафиксировано несколько позже в 1986 г., также в 1986–1989 гг. были отмечены точки перелома в уровнях болотных вод скважин, расположенных ближе к крайкам болота (скв. 108, 109, 210, 313, 316). Вторая точка перелома была обнаружена для большинства анализируемых рядов данных (среднегодовая температура воздуха, сток воды, уровни болотных вод), исключение составили ряды годовых сумм осадков и уровней болотных вод на центральных скважинах.

Определение точек перелома в рядах гидрометеорологических характеристик болотного массива Ламмин-Суо позволило выявить несколько квазистационарных периодов за время наблюдений. Анализ рядов осадков, стока и уровней болотных вод показал первый квазистационарный период с 1950 по 1978 г. Выделение второго и третьего периода оказалось более сложным, так как точки перелома появлялись в разных годах с 1993

по 2017 г. Однако чаще всего эти точки фиксировались в 2005 г., что определило второй квазистационарный период с 1979 по 2005 г. и третий период с 2006 по 2021 год.

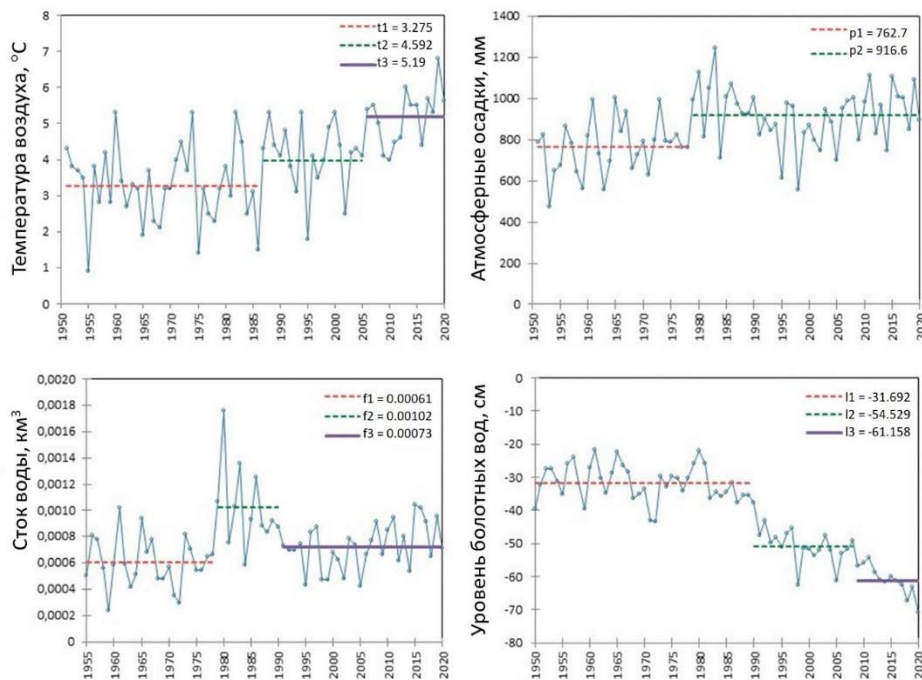


Рис. 2. Точки перелома в рядах данных измеренных на болотной метеостанции, сток воды с болота и уровень болотных вод в скважине 109.

Fig. 2. The change points in the data series measured at the peatland weather station, the runoff from the peatland and the peatland water level in the well 109.

2.2. Климатический прогноз

Ожидается повышение температуры воздуха для всех климатических сценариев, причем наибольший прирост температуры отмечается зимой (до 3,1 °C по сценарию SSP5-8.5 и 2,7 °C по сценарию SSP2-4.5 к 2041–2060 гг.). Для осени и лета характерны более низкие отклонения температуры воздуха, составляющие около 1,8 и 2,5 °C, соответственно, к середине века по сценариям SSP2-4.5 и SSP5-8.5 (рис. 3).

Наибольшее увеличение осадков зафиксировано в зимний период (до 10 % по сценарию SSP2-4.5 и 13 % для SSP5-8.5 к 2060 году). Весна и осень также характеризуются увеличением количества осадков по обоим сценариям. Оценка отклонений атмосферных осадков летнего периода с использованием двух радиационных сценариев сопровождается значительной степенью неопределенности.

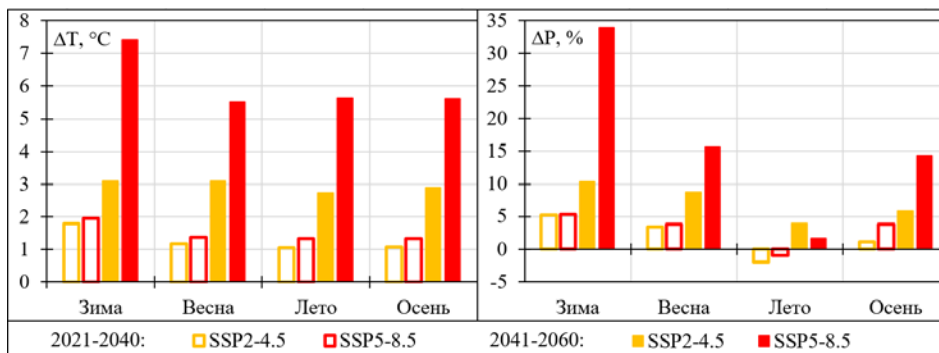


Рис. 3. Отклонения температуры воздуха (ΔT) и количества осадков (ΔP) по сезонам относительно исторического периода для двух сценариев радиационного воздействия SSP2-4.5 (оранжевый) и SSP5-8.5 (красный).

Fig. 3. Deviations of seasonal air temperature (ΔT) and precipitation (ΔP) from the historical period for two scenarios of radiation exposure SSP2-4.5 (orange) and SSP5-8.5 (red).

Полученные значения отклонений метеопараметров за каждый месяц были добавлены к первоначальным метеорологическим данным за период с 1995 по 2014 г., которые затем использовались для моделирования стока с болота Ламмин-Суо до 2060 года.

3. Гидрологический прогноз

Калибровка и верификация модели HBV для болота Ламмин-Суо проводились за период 2006–2021 гг., выделенный как последний квазистационарный период в процессе анализа однородности рядов данных [2]. Оценка будущего стока с болота Ламмин-Суо за период с 2021 по 2060 г. проводилась на основе определенных значений параметров модели за квазистационарный период и данных климатического моделирования.

На начальном этапе моделирования стока с болота Ламмин-Суо была проведена калибровка параметров модели за период с 2006 по 2016 г. Полученные параметры модели использовались в процессе верификации за период с 2017 по 2021 г. Точность расчетов речного стока оценивалась с помощью критериев NSE, KGE, R^2 . Средние значения этих критериев за период калибровки/верификации составили: NSE – 0,75/0,63, KGE – 0,77/0,65, R^2 – 0,76/0,66. Лучшие результаты были достигнуты для ручья Западного, где критерий NSE превышал 0,8 в течение 10 из 17 расчетных лет, достигая максимального значения 0,89, в то время как минимальное значение составляло 0,41. Максимальное значение критерия NSE для ручья Южного составило 0,84, а минимальное – 0,33. При моделировании стока ручья Северного в одном году из 17 расчетных значение критерия NSE было отрицательным (-0,55), но среднее значение за весь период расчета составило 0,59, а максимальное значение – 0,88. Таким

образом, полученные результаты моделирования могут считаться удовлетворительными для всех исследуемых болотных водосборов. Минимальные значения критериев качества моделирования были зафиксированы в годы с высоким уровнем половодья. Модель HBV для расчета таяния снега использует коэффициент стаивания, который иногда приводит к ошибкам в расчетах, так как скорость таяния снега зависит от температуры воздуха нелинейным образом. Точность расчетов зависит от особенностей погоды в весеннем сезоне, что не принималось во внимание в данной модели. Более точные результаты можно получить с использованием моделей, включающих уравнения теплового баланса снежного покрова в свои алгоритмы [7].

Параметры модели за квазистационарный период (2006–2021) использовались для прогнозирования стока болотных ручьев до 2060 г. Среднегодовые расходы воды на ручьях Южном и Северном показали положительную динамику в периоды 2021–2040 и 2041–2060 гг. по сравнению с расходами за квазистационарный период (рис. 4). Однако на ручье Западном наблюдается снижение среднегодовых расходов воды в период 2021–2040 гг., после чего следует небольшое увеличение в период 2041–2060 гг. (табл. 2).

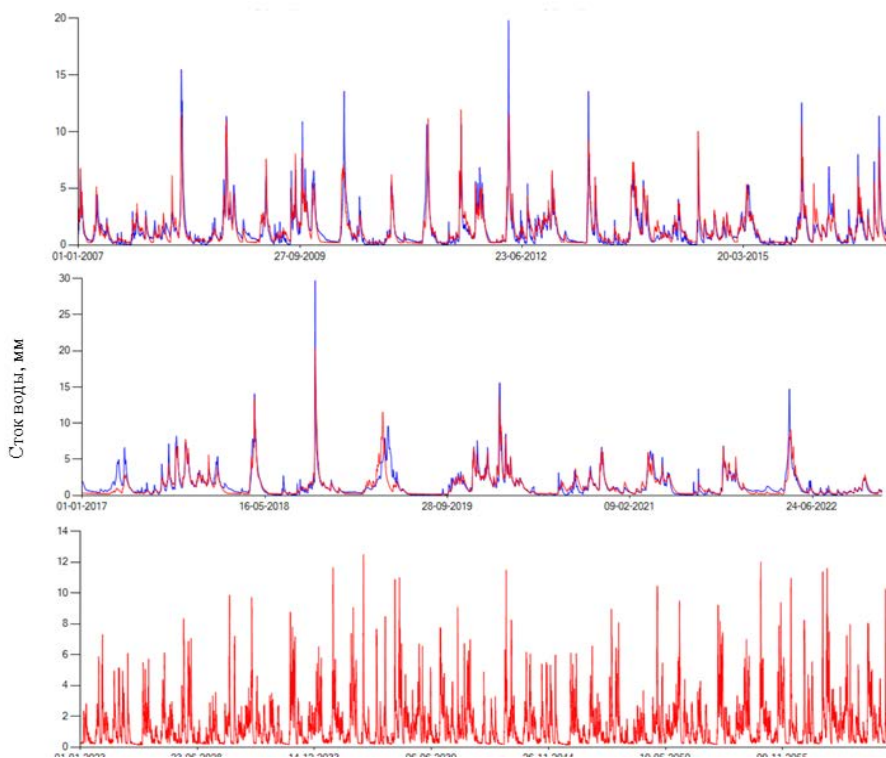


Рис. 4. Рассчитанные (красный) и наблюдаемые (синий) гидрографы стока (мм) для ручья Южного (болотный массив Ламмин-Суо) за 2007–2060 гг.
Fig. 4. Calculated (red) and observed (blue) flow hydrographs (mm) for Yuzhny stream (Lammin-Suomire) for 2007-2060.

Таблица 2. Среднегодовые расходы воды по ручьям болотного массива Ламмин-Суо за квазистационарный период наблюдений (2006–2021) и за периоды климатических проекций по сценариям SSP2-4.5 и SSP5-8.5

Table 2. The average annual water runoff by streams of the Lammin-Suo mire for the quasi-stationary observation period (2006–2020) and for the periods of climatic projections under scenarios SSP2-4.5 and SSP5-8.5

Ручей	Q _{ср.} (2006–2021), см ³ /с	Q _{ср.} (2021–2040), см ³ /с		Q _{ср.} (2041–2060), см ³ /с	
		SSP2-4.5	SSP5-8.5	SSP2-4.5	SSP5-8.5
Южный	15250	18228	18627	19435	19995
Северный	3952	5807	5911	6139	6306
Западный	5111	4920	5028	5220	5371

4. Анализ и прогноз уровня режима и ландшафтных изменений

В зависимости от характера изменений положения уровня болотных вод относительно поверхности болота скважины можно разделить на пять основных групп: 1) скважины, на которых отмечался рост УБВ в течении всего года (скв. 103, 104); 2) скважины, где происходило снижение УБВ в течении всего года (скв. 109, 210, 313, 316); 3) скважины, на которых рост уровня происходил в летний период (июнь–сентябрь), а в зимний и весенний периоды (ноябрь–май) наблюдалось снижение УБВ (скв. 107б); 4) скважины, для которых было выделено три квазистационарных периода, во второй из которых УБВ возрастал в течении всего года, а в третий период – снижался (скв. 101, 102а); 5) обратный случай, когда во втором квазистационарном периоде УБВ понизился, а в третий вырос (скв. 108). На скважине 106 точка перелома не обнаружена, а следовательно, анализ по периодам не производился. Было отмечено, что скважины в выделенных группах объединяет их месторасположение: группа 1 (скв. 103, 104) – генетический центр или его окрестности; группа 2 (скв. 109, 210, 313, 316) – крайки болота; группа 3 (скв. 107б) – грядово-мочажинный комплекс; группа 4 (скв. 101, 102а) – крайка болота рядом со склоном камовой гряды; группа 5 (скв. 108) – склоновая часть болота.

Далее рассмотрим наиболее значимые изменения уровня режима. Наибольшие изменения произошли на крайке болота (скв. 210, 313, 316), здесь падение УБВ наблюдалось в течении всего года. Среднегодовое значение УБВ понизилось на 10 см (скв. 210), 9 см (скв. 313) и 8 см (скв. 316). На скважинах 210 и 313 по значениям УБВ было обнаружено по одной точке перелома, что означает, что ряд наблюдений для каждой из скважин был разделен на два квазистационарных периода: 1950–1989, 1990–2021 гг. для скважины 210 и 1950–1986, 1987–2021 гг. для скважины 313. Обе скважины располагаются на мохово-травяном микроландшафте. Анализ внутригодовой динамики показал, что в течении года наименьшее понижение УБВ на скважинах 210, 313

происходило в июле-августе и составляло от 4 до 7 см. Для скважины 316, расположенной в мохово-лесном микроландшафте, было обнаружено три квазистационарных периода, в течении которых картина внутригодовой динамики уровней была не так однозначна. По сравнению со среднемесячными значениями первого периода (1950–1997) во второй период (1998–2011) наибольшее снижение УБВ, наблюдалось в мае (11 см) и с сентября по декабрь (9–10 см). В третий период (2012–2021) наибольшее снижение уровня болотных вод, напротив, отмечалось в весенне-летний период с апреля по июль и изменялось от 10 до 14 см.

Обратная ситуация наблюдалась в центральной части болота с преобладанием мохового микроландшафта (скв. 104). Здесь в период 1978–2021 гг. наблюдался рост УБВ. Среднегодовое значение УБВ выросло на 7 см по сравнению с более ранним периодом 1950–1978 гг. Наибольшие изменения происходили с февраля по март, когда среднемесячный рост уровня составил 11 и 14 см соответственно.

Для скважин, на которых за период наблюдений произошла смена микроландшафта, были определены УБВ в период перехода микроландшафта из одной группы в другую и сопоставлены с характерными средними уровнями. Таких скважин было три, две из которых (скв. 101 и 106) оказались не репрезентативными. На скважине 101 произошла смена микроландшафта от мохового (1950–1974) к мохово-лесному (1975–2004) и далее к лесному (2005–2021). Скважина расположена на окрайке болота под склоном камово-озовой гряды. Склоновый сток оказывает сильное воздействие на водный режим в данной части болота и делает участок уникальным и не характеризующим процесс смены микроландшафта в других частях болота Ламмин-Суо. В районе скважины 106 грядово-мочажинный микроландшафт (1950–1969) сменился на мохово-лесной (1970–2021) за счет постепенной деградации гряд. Среднегодовой УБВ при этом изменился незначительно, понизившись с -15 до -17 см. Это может означать, что в случае грядово-мочажинного комплекса существенным фактором смены микроландшафта является не столько положение болотных вод относительно поверхности, сколько изменение уклона поверхности, определяющего условия стекания воды.

В районе скважины 109 произошла смена микроландшафта из мохово-лесной (1950–2004) в лесную группу (2005–2021). Анализ среднегодовых УБВ показал, что критической отметкой стало значение 50 см ниже поверхности болота, при условии нескольких последовательно повторяющихся лет с низкими уровнями.

Среднегодовые уровни болотных вод являются одной из важнейших характеристик гидрологического режима верховых болот и напрямую связаны с величиной стока с болот. В связи с этим прогноз уровня режима болота Ламмин-Суо за 2021–2060 гг. был выполнен на основе результатов моделирования стока по ручьям, вытекающим с болота за аналогичный период. Для этого была рассчитана связь годового стока ручьев, вытекающих с болота, и среднегодовых значений уровней болотных вод за период

2006–2021 гг. При значении коэффициента корреляции между уровнем болотных вод и стоком от 0,6 и выше статистическая связь определялась как надежная с возможностью применения уравнений регрессии. Значимая связь была определена для 4 из 11 скважин и составила 0,6 – скв. 101, 0,76 – скв. 102а, 0,74 – скв. 103, 0,69 – скв. 104. Все четыре скважины расположены на водосборе ручья Западного (скв. 101, 102а, 103, 104). Для уравнения линейной регрессии каждой из выбранных скважин была рассчитана погрешность по величине средней ошибки аппроксимации. Погрешность составила 12 % (скв. 101), 9 % (скв. 102а), 10 % (скв. 103) и 14 % (скв. 104), и так как ни в одном из случаев она не превышала 15 %, регрессионные модели были оценены как адекватные. Рассчитанные значения среднего, максимального и минимального уровней болотных вод за период 2021–2060 гг. приведены в табл. 3.

Таблица 3. Уровни болотных вод на водосборе ручья Западного (измеренные и прогнозируемые)

Table 3. Peatland water levels in the Western stream watershed (measured and predicted)

Скважина болотных вод	Тип микроландшафта	Средние годовые уровни болотных вод, см		
		макс	ср	мин
Измеренные за период 1950–2021 гг.				
101	лесной	-12	-18	-23
102а	моховой	-12	-21	-34
103	моховой	-11	-20	-34
104	моховой	-8	-20	-34
Прогноз на период 2021–2060 гг. по модели SSP2-4.5				
101	лесной	-15	-19	-22
102а	моховой	-17	-21	-25
103	мохово-травяной	-12	-16	-20
104	мохово-травяной	-10	-15	-20

В период 2021–2060 гг. на скважинах 103, 104, относящихся к центральной, наиболее возвышенной части болота, прогнозируется рост уровня болотных вод на 4–5 см. Незначительное снижение уровня болотных вод возможно на скважине 101, расположенной на окрайке болота. На скважине 102а, находящейся вблизи болотного озера, изменений среднего уровня болотных вод не ожидается. При этом на всех рассмотренных скважинах прогнозируется рост минимальных уровней болотных вод, от 1 см на окрайке болота (скв. 101), до 14 см в центральной части (скв. 103, 104).

Для скважин, расположенных на водосборе ручья Южного, ненадежность полученных статистических связей может быть объяснена недоучетом стока с данной части болота. В восточной части водосбора ручья Южного с болота вытекает временный водоток, сток из которого ранее наблюдался только в период весеннего половодья. В последнее десятилетие временный водоток выработал русло и превратился в постоянный. Кроме того, дополнительный водоток сформировался севернее устья ручья Южного. Образование новых водотоков может быть причиной снижения уровней болотных вод в данной части болота.

Заключение

В последние 30 лет на болоте Ламмин-Суо наблюдается снижение уровня болотных вод на всех скважинах, находящихся на окрайках болотного массива. Это вызвано современными гидроклиматическими процессами, характеризующимися ростом температуры воздуха, сокращением продолжительности зим, частыми оттепелями в зимний период, отсутствием весеннего половодья. В таких условиях для верховых болот Северо-Запада минимальный уровень болотных вод может рассматриваться как критический, то есть определяющий переход одной группы микроландшафта в другую.

Анализ результатов климатического и гидрологического моделирования показывает несущественную разницу между сценариями SSP2-4.5 и SSP5-8.5. Разница среднегодовых расходов воды по исследуемым болотным ручьям составила 2–2,5 %. Поэтому для оценки уровня режима болота до 2060 г. использовались данные моделирования только по сценарию SSP2-4.5.

По данным моделирования на скважинах 101 и 102а, расположенных вблизи озер, значительных изменений уровня режима не ожидается. На скважинах 103 и 104, расположенных вблизи купола болота, средний годовой уровень болотных вод вырастет на 4–5 см, при этом минимальный уровень повысится на 14 см. Такие изменения положения болотных вод могут привести к смене растительности с моховой на мохово-травяную. Ожидаемый подъем уровня болотных вод на данном участке болота может неблагоприятно сказаться на древостое и привести к постепенной гибели растущих здесь сосен. При этом продолжение облесения прогнозируется для краевых частей болота, особенно на водосборе Южного ручья, где сформировавшиеся за последние десятилетия водотоки будут увеличивать разгрузку болота и снижать уровень болотных вод.

По результатам проведенного исследования можно сделать выводы.

1. Современные гидроклиматические процессы вызывают понижение уровней болотных вод на периферии болотного массива и приводят к незначительному повышению уровней в центральной части болота.

2. При смене микроландшафтов в качестве определяющего фактора может рассматриваться средний минимальный уровень болотных вод.

3. Несмотря на прогнозируемое изменение уровней болотных вод, болотные микроландшафты останутся достаточно устойчивыми к ожидаемым изменениям климата при оценке водного режима на ближайшие 40 лет.

Список литературы

1. Батуев В.И., Новиков С.М. Гидрометеорологический режим и водный баланс верховых болот Северо-Запада России. СПб.: Свое Издательство, 2019. 448 с.
2. Болгов М.В., Коробкина Е.А., Филиппова И.А. Байесовский прогноз минимального стока в нестационарных условиях с учетом возможных изменений климата // Метеорология и гидрология. 2016. № 7. С. 72-81.
3. Боч М.С., Смагин В.А. Флора и растительность болот Северо-Запада России и принципы их охраны. СПб.: Гидрометеоиздат, 1993. 223 с.
4. Галкина Е.А. Болотные ландшафты и принципы их классификации // Сборник научных работ БИН АН СССР (1941–1943). М.; Л., 1946. С. 139-156.
5. Журавлева А.Д., Скороспехова Т.В. Математическое моделирование стока с олиготрофных болот в условиях нарушения стационарности временных рядов (на примере болота Ламмин-Суо) // Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Гидрометеорология и физика атмосферы: современные достижения и тенденции развития», Санкт-Петербург, 21–23 марта 2023 г. С. 203-207.
6. Журавлева А.Д., Скороспехова Т.В., Курочкина Л.С., Грек Е.Н. Моделирование стока с верхового болота с использованием сценариев изменения климата до 2060 года (на примере болота Ламмин-Суо) // Пятые Виноградовские чтения. Гидрология в эпоху перемен: Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова, Санкт-Петербург, 05–14 октября 2023 года. СПб.: Изд-во ВВМ, 2023. С. 181-186.
7. Журавлева А.Д. Оценка климатообусловленных изменений гидрометеорологического режима верховых болот на примере болота Ламмин-Суо // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению: Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского ученого Юрия Борисовича Виноградова, Санкт-Петербург, 23–31 октября 2020 года. СПб.: Изд-во ВВМ, 2020. С. 72-77.
8. Иванов К.Е. Основы гидрологии болот лесной зоны. Л.: Гидрометеоиздат, 1957. 500 с.
9. СТО ФГБУ ГГИ 08.30-2011. Методические указания по расчетам стока с неосушенных и осушенных болот. 136 с.
10. Романова Е. А. О связи между растительностью, верхними слоями торфяной залежи и водным режимом верховых болот Северо-Запада // Труды ГГИ. 1960. Вып. 89. С. 92-122.
11. Романова Е.А. Геоботанические основы гидрологического изучения верховых болот. Л.: Гидрометеоиздат, 1961. 214 с.
12. Скороспехова Т.В., Журавлева А.Д., Батуев В.И. Трансформация гидрологического режима олиготрофного болота Ламмин-Суо при климатических изменениях и смена микроландшафтов как результат естественной эволюции болотного массива // Материалы конференции «XII Галкинские Чтения – Типы болот регионов России», Санкт-Петербург, 3 февраля 2023 г. СПб.: БИН РАН, 2023. С. 98-101.
13. Указания по расчетам стока с неосушенных и осушенных верховых болот. Л.: Гидрометеоиздат, 1971. 84 с.
14. Alexandersson H. A homogeneity test applied to precipitation data // Journal of Climatology. 1986. Vol. 6, no. 6. P. 661-675.
15. Bergström S. The HBV model // Computer Models of Watershed Hydrology, edited by Singh V.P. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, USA, 1995. P. 443-476.

16. Buishand T.A. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records // Journal of Hydrology. 1982. Vol. 58, is. 1–2. P. 11-27.
17. Edvardsson, J., Hansson, A. Multiannual hydrological responses in Scots pine radial growth within raised bogs in southern Sweden // Silva Fennica. 2015. Vol. 49, no. 4. DOI: 10.14214/sf.1354.
18. Graham L.P., Andréasson J., Carlsson B. Assessing climate change impacts on hydrology from an ensemble of regional climate models, model scales and linking methods—a case study on the Lule River basin // Climatic Change. 2007. Vol. 81 (S1). P. 293-307. DOI: 10.1007/s10584-006-9215-2.
19. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers / Working Group I Contribution of to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 2021. 39 p.
20. IPCC WGI Interactive Atlas. <https://interactive-atlas.ipcc.ch/>
21. Joosten H., Sirin A., Couwenberg J., Laine J., Smith P. The role of peatlands in climate regulation. Peatland Restoration and Ecosystem Services: Science, Policy and Practice // Ecological Reviews. Cambridge: Cambridge University Press, 2016. P. 63-76.
22. Nancy B.D. Peatland Response to Global Change // Science. 2009. Vol. 326 (5954). P. 810-811. DOI: 10.1126/science.1174268
23. Pettit A.N. A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem // Journal of the Royal Statistical Society. 1979. Series C (Applied Statistics). Vol. 28 (2). P. 126-135. DOI: 10.2307/2346729.
24. Teutschbein C., Seibert J. Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods // Journal of Hydrology. 2012. Vol. 456. P. 12-29.
25. Wijngaard J., Tank A., Können G. Homogeneity of 20th Century European Daily Temperature and Precipitation Series // International Journal of Climatology. 2003. Vol. 23. P. 679-692.
26. Zhuravleva A.D., Terekhov A.V., Skorospikhova T.V., Batuev V.I., Kurochkina L.S., Chepikova S.S., Yahlakov B.V. Long-term hydrometeorological observations (1952–2020) at the Lammin-Suo Peatland Station, north-west Russia // Mires and Peat. 2024. Sep. 2, 31 pp. DOI: 10.19189/MaP.2023.

References

1. Batuev V.I., Novikov S.M. Gidrometeorologicheskii rezhim i vodnyy balans verhovyyh bolot Severo-Zapada Rossii [Hydrometeorological regime and water balance of the raised bogs of the North-West of Russia], Saint-Petersburg, Svoe Izdatel'stvo publ., 2019, 448 p. [in Russ]
2. Bolgov M.V., Korobkina E.A., Filippova I.A. Bayesian prediction of minimum river runoff under nonstationary conditions of future climate change. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, 2016, vol. 41, pp. 497-503. DOI: 10.3103/S1068373916070074.
3. Boch M.S., Smagin V.A. Flora i rastitel'nost' bolot Severo-Zapada Rossii i principy ih ohrany [Flora and vegetation of peatlands of the North-West of Russia and the principles of their protection], Saint Petersburg, Gidrometeoizdat publ., 1993, 223 p. [in Russ]
4. Galkina E.A. Bolotnye landshafty i principy ih klassifikatsii [Peatlands landscapes and the principles of their classification]. *Sbornik nauchnykh rabot BIN AN SSSR (1941-1943)* [Collection of scientific papers of the BIN of the USSR Academy of Sciences (1941-1943)], Moscow, 1946, pp. 139-156 [in Russ]
5. Zhuravleva A.D., Skorospikhova T.V. Mathematical modeling of runoff from oligotrophic peatlands in conditions of violation of the stationarity of time series (on the example of the Lammin-Suomire). Materials of the All-Russian Scientific and Practical Conference "Hydrometeorology and atmospheric physics: modern achievements and development trends", St. Petersburg, March 21-23, 2023. pp. 203-207 [in Russ].
6. Zhuravleva A.D., Skorospikhova T.V., Kurochkina L.S., Grek E.N. Modelirovanie stoka s verhovogo bolota s ispol'zovaniem scenariyv izmeneniya klimata do 2060 goda (na primere bolota Lammin-Suo) [Modeling runoff from a raised bog using climate change scenarios up to 2060

(on the example of the Lammin-Suomire)]. *Fifth Vinogradov readings*. Hydrology in the era of change: A collection of reports of the International scientific conference in memory of the outstanding Russian scientist Yuri Borisovich Vinogradov, St. Petersburg, October 05-14, 2023. St. Petersburg: VVM Publishing House, LLC, 2023, pp. 181-186 [in Russ]

7. *Zhuravleva A.D.* Ocenka klimatoobuslovlennykh izmeneniy gidrometeorologicheskogo rezhima verhovyyh bolot na primere bolota Lammin-Suo [Assessment of climate-related changes in the hydrometeorological regime of raised bogs on the example of the Lammin-Suomire]. *The Fourth Vinogradov Readings. Hydrology from cognition to worldview*: a collection of reports of the international scientific conference in memory of the outstanding Russian scientist Yuri Borisovich Vinogradov, St. Petersburg State University, October 23–31, 2020, St. Petersburg: VVM Publishing House, LLC, 2020, pp. 72-77 [in Russ]

8. *Ivanov K.E.* Osnovy gidrologii bolot lesnoy zony [Fundamentals of hydrology of the forest zone/peatlands], Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1957, 500 p. [in Russ]

9. Roshydromet, STO FGBI GGI 08.30-2011. Metodicheskie ukazaniya po raschetam stoka s neosushennykh i osushennykh bolot [Methodological guidelines for calculating runoff from non-drained and drained peatlands]. Roshydromet, [Ministry of Natural Resources and Ecology of the Russian Federation. Federal Service for Hydrometeorology and Environmental Monitoring], 2011, 136 p. [in Russ]

10. *Romanova E. A.* On the relationship between vegetation, the upper layers of a peat deposit and the water regime of the raised bogs of the North-West. *Trudi GGI*, 1960, no. 89, pp. 92-122 [in Russ]

11. *Romanova E.A.* Geobotanicheskie osnovy gidrologicheskogo izucheniya verhovyyh bolot [Geobotanical foundations of hydrological study of raised bogs], Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1961, 214 p. [in Russ]

12. *Skorospekhova T. V., Zhuravleva A.D., Batuev V. I.* Transformatsiya gidrologicheskogo rezhima oligotrofnogo bolota Lammin-Suo pri klimaticheskikh izmeneniyah i smena mikrolandschaftov kak rezul'tat estestvennoy evolyucii bolotnogo massiva [Transformation of the hydrological regime of the oligotrophic mire/Lammin-Suo under climatic changes and the change of micro-landscapes as a result of the natural evolution of the peatland/massif]. Materials of the conference "XII Galkin Readings – Types of mires of the regions of Russia", St. Petersburg: BIN RAS publ., 2023, pp. 98-101 [in Russ]

13. Instructions on the calculation of runoff from non-drained and drained raised bogs. Leningrad, Gidrometeoizdat publ., 1971, 84 p. [in Russ]

14. *Alexandersson H.* A homogeneity test applied to precipitation data. *Journal of Climatology*, 1986, vol. 6, no. 6, pp. 661-675.

15. *Bergström S.* The HBV model. Computer Models of Watershed Hydrology, edited by Singh V.P. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, USA, 1995, pp. 443-476.

16. *Buishand T.A.* Some methods for testing the homogeneity of rainfall records. *Journal of Hydrology*, 1982, vol. 58, no. 1-2, pp. 11-27.

17. *Edvardsson, J., Hansson, A.* Multiannual hydrological responses in Scots pine radial growth within raised bogs in southern Sweden. *Silva Fennica*, 2015, vol. 49, no. 4. DOI: 10.14214/sf.1354.

18. *Graham L.P., Andréasson J., Carlsson B.* Assessing climate change impacts on hydrology from an ensemble of regional climate models, model scales and linking methods—a case study on the Lule River basin. *Climatic Change*, 2007, vol. 81 (S1), pp. 293-307. DOI: 10.1007/s10584-006-9215-2.

19. IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers. Working Group I Contribution of to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. IPCC, Geneva, Switzerland, 2021. 39 p.

20. IPCC WGI Interactive Atlas. Available at: interactive-atlas.ipcc.ch/

21. *Joosten H., Sirin A., Couwenberg J., Laine J., Smith P.* The role of peatlands in climate regulation. Peatland Restoration and Ecosystem Services: Science, Policy and Practice. Ecological Reviews. Cambridge: Cambridge University Press, 2016, pp. 63-76.

22. *Nancy B.D.* Peatland Response to Global Change. *Science*, 2009, vol. 326 (5954), pp. 810-811. DOI: 10.1126/science.1174268

23. *Pettit A.N.* A Non-Parametric Approach to the Change-Point Problem. *Journal of the Royal Statistical Society*, 1979, Series C (Applied Statistics), vol. 28 (2), pp. 126-135. DOI: 10.2307/2346729

24. *Teutschbein C., Seibert J.* Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods. *Journal of Hydrology*, 2012, vol. 456, pp. 12-29.

25. *Wijngaard J., Tank A., Können G.* Homogeneity of 20th Century European Daily Temperature and Precipitation Series. *International Journal of Climatology*, 2003, vol. 23, pp. 679-692.

26. *Zhuravleva A.D., Terekhov A.V., Skorospekhova T.V., Batuev V.I., Kurochkina L.S., Chepikova S.S., Yahlakov B.V.* Long-term hydrometeorological observations (1952–2020) at the Lammin-Suo Peatland Station, north-west Russia. *Mires and Peat*, 2024, Sep. 2, 31 p. DOI: 10.19189/МаP.2023.

*Поступила 03.07.2024; одобрена после рецензирования 02.12.2024;
принята в печать 10.12.2024.*

*Submitted 03.07.2024; approved after reviewing 02.12.2024;
accepted for publication 10.12.2024.*