

УДК 550.72:631.46

СЕЗОННАЯ ДИНАМИКА ЧИСЛЕННОСТИ МИКРООРГАНИЗМОВ ТОРФЯНОЙ ЗАЛЕЖИ ВЕХОВЫХ БОЛОТ ЮЖНОПРИБЕЛОМОРСКОГО ТИПА

**Шпанов Д.А., Zubov И.Н., Пономарева Т.И., Штанг А.К.,
Орлов А.С., Забелина С.А., Селянина С.Б.**

*ФГБУН Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики
имени академика Н.П. Лаврова УрО РАН, Архангельск, e-mail: gumin@fciarctic.ru*

Верховые болотные комплексы южноприбеломорского типа широко распространены на европейском Севере. Численность и состав микробиоты торфа обуславливают особенности протекания процессов биотрансформации органического вещества. В настоящем исследовании выполнена оценка сезонной динамики численности аммонифицирующих, нитрифицирующих, олиготрофных, ацидофильных бактерий и грибов методом посевов на твердые среды. Образцы отбирали в период с марта по октябрь из 6 горизонтов торфяной залежи с контрастными окислительно-восстановительными режимами на территории олиготрофного сфагнового грядово-мочажинного комплекса Иласского болотного массива (Архангельская область). Параллельно с определением микробной численности проводили измерение окислительно-восстановительного потенциала, кислотности (рН), степени разложения, зольности, элементного состава (С, Н, О и N) торфа. Установлено, что торфяная залежь характеризуется низкой минерализацией (не превышает 0,9%), низкой степенью разложения (до 20% в основном теле залежи), контрастным окислительно-восстановительным режимом. Максимальная численность всех групп микроорганизмов приходится на период с конца мая по конец июля. Данные о численности микробных сообществ свидетельствуют о протекании процессов микробиологической деструкции по всей глубине залежи. Наибольшие количественные сезонные изменения происходят в чувствительном к воздействию сезонных изменений климатических факторов верхнем слое залежи (0–40 см), поскольку он напрямую подвержен действию солнечной радиации и осадков, определяющих величину колебаний уровня болотных вод. Нижележащие и в той или иной мере изолированные слои залежи, формирование которых растянуто во времени, в меньшей мере подвержены сезонным климатическим пульсациям. При этом они могут служить источником информации о влиянии долговременных климатических воздействий.

Ключевые слова: верховые болота, торфяная залежь, сезонная динамика численности микроорганизмов, окислительно-восстановительные условия, аэробный слой, анаэробный слой

SEASONAL DYNAMICS OF MICROORGANISMS ABUNDANCE IN PEAT DEPOSITS OF BOGS OF THE SOUTH-BELOMORIAN TYPE

**Shpanov D.A., Zubov I.N., Ponomareva T.I., Shtang A.K.,
Orlov A.S. Zabelina S.A., Selyanina S.B.**

*N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research of the Ural Branch
of the Russian Academy of Sciences, Arkhangelsk, e-mail: gumin@fciarctic.ru*

Bog complexes of the South-Belomorian type are widespread in the European North. Abundance and content of peat microbiota determine the features of organic matter biotransformation processes. In the present study, the seasonal dynamics of the abundance of ammonifying, nitrifying, oligotrophic, acidophilic bacteria and fungi was assessed by the method of inoculation on solid media. The samples were taken from March to October from 6 peat layers with contrasting redox regimes on the territory of the oligotrophic sphagnum ridge-hollow complex of the Ilas bog (Arkhangelsk region). On the sidelines of the determination of microbial abundance the redox potential, acidity (pH), degree of decomposition, ash content, and elemental composition (C, H, O, and N) of peat were investigated. It has been established that the peat deposit is characterized by low mineralization (does not exceed 0.9%), low degree of decomposition (up to 20% in the main body of the deposit), and contrast redox regime. The maximum abundance of all groups of microorganisms falls on the period from the end of May to the end of July. Data on the microbial communities' abundance indicate the occurrence of microbiological destruction processes throughout the depth of the deposit. The greatest quantitative seasonal changes occur in the upper layer of the deposit (0–40 cm), which is sensitive to the effects of seasonal changes in climatic factors, since it is directly exposed to solar radiation and precipitation, which determine the fluctuations of bog water level. The underlying and, to some extent, isolated layers of the peat deposit, the formation of which is extended in time, are less susceptible to seasonal climatic fluctuations. At the same time, they can serve as a source of information on the influence of long-term climatic changes.

Keywords: Bogs, peat deposit, seasonal dynamics of abundance of microorganisms, redox conditions, aerobic layer, anaerobic layer

Верховые болотные комплексы южно-прибеломорского типа широко распространены в арктической зоне РФ [1-3]. Болотные экосистемы играют существенную роль в круговороте углерода. Являясь единственными в наземном биоме экосистемами, обе-

спечивающими постоянный сток углерода, они веками аккумулируют его в составе торфяной залежи. Не менее важна климато-образующая роль болот, связанная с эмиссией углекислого газа и метана, с балансом тепла и влаги [4, 5].

Одни из важнейших аспектов функционирования торфяников – биохимические процессы, протекающие в них и включающие в себя ряд отдельных циклов: минерализацию и гумификацию органического вещества, растворение и преобразование продуктов гидролиза посредством микробиологической трансформации и физико-химических процессов обмена [6, 7]. Это приводит к газообмену между торфом и атмосферой. За счет высвобождения углерода в виде метана и углекислого газа меняются состав органического вещества, молекулярная структура отдельных компонентов, протекает синтез новых соединений. В совокупности это обеспечивает устойчивость болот.

Численность и состав микроорганизмов торфа, обуславливающие скорость протекания биологических процессов, зависят не только от высокого содержания органического углерода, но и от внешних факторов, таких как: влажность, температура, минерализация и др. [8]. В торфяниках, где выявлено преимущественное образование метана из-за понижения уровня грунтовых вод вследствие осушительной мелиорации, значительно увеличивается образования диоксида углерода [9]. Температура и обводненность торфяной залежи существенно варьируют в течение года.

Цель исследования: оценка сезонной динамики численности микроорганизмов верхового болотного комплекса южноприбеломорского типа.

Материал и методы исследования

Исследования проводили на ненарушенном участке в центре грядово-мочажинного комплекса Иласского болотного массива, расположенного в Приморском районе Архангельской области (64° 19' 43" N, 40° 36' 45" E) и относящегося к южноприбеломорскому типу верховых болот.

Окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) и pH торфяной залежи определяли с использованием универсального анализатора Expert-001 («Эконикс-Эксперт», Россия) с комбинированным платиновым электродом ERP-105 для измерения значений ОВП (E, мВ) в жидких и гетерогенных средах и комбинированным электродом ESK-10603 для измерения pH.

Пересчет полученных значений Eh на стандартные условия (t=25°C и pH=4,0) проводили с использованием следующих уравнений:

$$E_t = E + 197 - 0,76 \times (t - 25) \quad (1)$$

$$E_h = E_t + 56,2 \times (pH - 4) \quad (2)$$

где E (мВ) – измеренное значение окислительно-восстановительного потенциала;

197 (мВ) – поправочный коэффициент для полуэлектрода, насыщенного хлоридом серебра, чтобы показания были эквивалентны показаниям обычного водородного электрода при 25°C;

t (°C) – температура торфа в момент измерения.

Отбор репрезентативных проб торфа проводили методом послойного бурения с разделением на 20-сантиметровые горизонты пробоотборником для торфяных отложений Р 04.09 (EIJKELKAMP, Нидерланды) по ГОСТ 17644 – 83.

Степень разложения торфа определяли по ГОСТ 10650-2013, тип торфа – методом световой микроскопии (ГОСТ 28245-89) в проходящем свете с использованием микроскопа Altami Био 2 (Россия) в комплекте с цифровой камерой U3CMOS14000KPA, содержание влаги – гравиметрическим методом (ГОСТ 28268-89), зольность – методом сжигания (ГОСТ 11306-2013).

Содержание C, H и N в пробах определяли на анализаторе элементного состава EuroEA 3000 CHN (Eurovector, S.p.A.), а O – по разнице между общей массой и суммой других элементов.

Отбор проб торфа для микробиологических исследований: (1) в морозный период с высоким уровнем снежного покрова (март), (2) в период активного снеготаяния и максимальной обводненности болотного массива (конец мая), (3) в период летней межени (конец июля), (4) в осенний период (начало октября). Торфяной керн извлекали с заданной глубины и, используя стерильные перчатки, отбирали пробу из центральной части каждого керна в стерильную тару. Гомогенизированные пробы торфа переносили в колбы, содержащие 100 мл стерильной воды, и экстрагировали с помощью ультразвуковой обработки (ультразвуковой диспергатор УЗДН-1) в течение 2 минут при силе тока 0,44 А и частоте колебаний 22 кГц.

Микробиологические исследования проводили по общепринятым методикам [10]. Посев производили в 3–5-кратной повторности из соответствующих разведений на следующих средах: мясо-пептонный агар (МПА) для определения аммонифицирующих бактерий, утилизирующих органические формы азота; крахмало-аммиачный агар (КАА) – бактерий, усваивающих минеральные формы азота; декстрозо-пептон-

ный агар Сабуро (ДПА) – грибов и кислотолюбивых бактерий (дрожжей); голодный агар (ГА) – олиготрофных автохтонов. Используемые методы не позволяют учесть все разнообразие жизнеспособных бактерий, но дают общую характеристику состава аэробной и факультативно-анаэробной частей микробного сообщества [11-13].

Результаты исследования и их обсуждение

Согласно проведенным исследованиям, торфяной залежи Иласского болотного массива свойственны следующие характеристики (таблица). Основная часть залежи сложена малозольным верховым торфом сфагнового типа низкой степени разложения (до 15–20%). В ботаническом торфе преобладает *Sphagnum fuscum* (Schimp.) H. Klinggr. На глубине ниже 240 см появляется переходный торф с более высокой степенью разложения (до 40%), образованный преимущественно травянистой мезотрофной растительностью (*Scheuchzeria palustris* L. и *Eriophorum vaginatum* L.). Доминирование олиготрофных видов согласуется с низким содержанием минеральных компонентов (таблица). Согласно полученным

экспериментальным данным, средние значения зольности по горизонтам, как правило, не превышают 0,9%. Незначительное повышение (до 1,2–1,3%) наблюдается в поверхностном и придонном слоях.

Вся торфяная залежь по степени аэрации и трансформации органического вещества может быть условно поделена на несколько зон (рис. 1): акротелм (торфогенный, аэрируемый слой) зона I (от поверхности до 40 см) и катотелм (не аэрируемый слой) – зона II (ниже 40 см). В катотелме, в свою очередь, можно выделить еще 3 подзоны: зону промерзания (40–100 см), зону консервации (100–300 см) и придонную зону (300–360 см), протяженность которых в вертикальной проекции залежи определяется климатическими, гидрологическими и геологическими особенностями расположения болотного массива. По вертикальному профилю залежи происходят изменения окислительно-восстановительного потенциала (рис. 1) и элементного состава (таблица, рис. 2). Слабоокислительные условия при движении от поверхности вглубь залежи постепенно меняются на слабо-восстановительные, а затем – на умеренно восстановительные.

Изменение типа, степени разложения,
зольности и элементного состава торфа по глубине

Горизонт, см	Тип торфа	R,%	Z,%	Атомное содержание			
				N ср	C ср	H ср	O ср
0–20	пушицево-сфагновый	0–5	1,18± 0,02	0,07	4,01	6,95	2,59
20–40	сфагновый	5–10	0,72± 0,01	0,09	4,32	7,11	2,35
40–60	сфагновый	5–10	0,61± 0,01	0,08	4,20	7,02	2,45
60–80	пушицево-сфагновый	5–10	0,85± 0,03	0,11	4,63	7,36	2,07
80–100	сфагновый	10–15	0,91± 0,02	0,13	4,82	7,65	1,90
100–120	пушицево-сфагновый	10–15	0,92± 0,05	0,10	4,61	7,30	2,10
120–140	пушицево-сфагновый	12–17	0,97± 0,01	0,10	4,49	7,31	2,20
140–160	сфагновый	12–17	0,78± 0,01	0,11	4,62	7,26	2,10
160–180	сфагновый	15–20	0,81± 0,02	0,10	4,38	7,03	2,30
180–200	сфагновый	15–20	0,76± 0,03	0,12	4,52	7,33	2,16
200–220	сфагновый	15–20	1,26± 0,02	0,11	4,56	7,22	2,13
220–240	сфагновый	15–20	0,83± 0,02	0,10	4,39	7,28	2,28
240–260	пушицево-сфагновый	20–30	0,73± 0,01	0,13	4,70	7,42	2,01
260–280	пушицево-шейхцериево-сфагновый	20–30	0,9± 0,03	0,13	4,75	7,49	1,96
280–300	шейхцериево-сфагновый	30–35	0,95± 0,02	0,12	4,76	7,18	1,98
320–340	шейхцериево-сфагновый	35–40	1,24± 0,05	0,13	4,73	7,40	1,98
340–360	шейхцериевый	35–40	1,2± 0,01	0,15	4,64	7,20	2,03

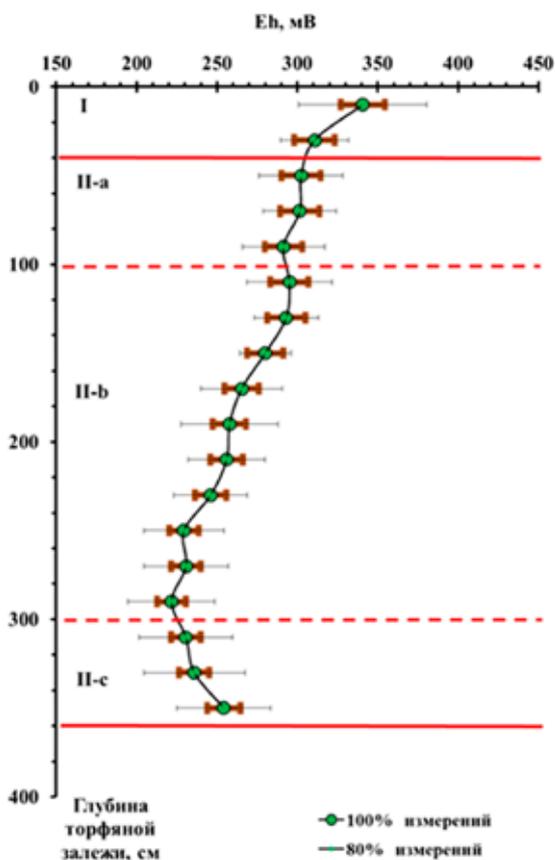


Рис. 1. Изменение окислительно-восстановительного потенциала Eh (мВ) по глубине торфяной залежи

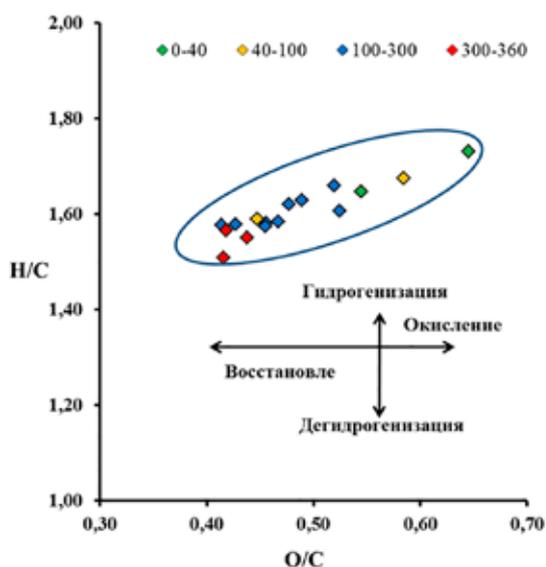


Рис. 2. Диаграмма Ван Кревелена исследованных образцов торфа

Для исследования сезонной динамики численности микроорганизмов были

выбраны слои, различающиеся по окислительно-восстановительному режиму: 0–10, 40–50, 100–110, 150–160, 200–210 и 300–310 см. Согласно полученным данным (рис. 3), численность аммонификаторов на исследуемом участке залежи варьировалась от $0,7 \cdot 10^2$ до $2,9 \cdot 10^5$ КОЕ/г абсолютно сухого торфа (а.с.т.). Максимальное значение во все периоды отбора приходилось на верхний слой акротелма (0–10 см). При продвижении вглубь залежи уже на нижней границе акротелма (40–50 см) наблюдаются резкое снижение их количества в 30 и более раз и дальнейшее сохранение значений на уровне $0,5–3,0 \cdot 10^3$ КОЕ/г.

Сезонные изменения численности аммонификаторов в акротелме свидетельствуют о ключевом влиянии уровня аэрации и прогрева залежи, что согласуется с исследованиями олиготрофных и эвтрофных болот Западной Сибири [14, 15]. В частности, в зимне-весенний период численность этой группы микроорганизмов практически не менялась и составила $0,98–0,99 \cdot 10^5$ КОЕ/г. Однако повышение температуры воздуха и залежи, а также снижение уровня болотных вод (УБВ) привели к увеличению числа выращенных колоний втрое – до $2,9 \cdot 10^5$ КОЕ/г. Таким образом, максимум численности бактерий, усваивающих органический азот, приходится на июль – период максимального прогрева верхних слоев торфяной залежи, также сопровождающийся минимальными значениями уровня болотных вод (УБВ).

Численность бактерий, усваивающих минеральные формы азота, существенно ниже и варьируется в пределах от $0,9 \cdot 10^2$ до $6,3 \cdot 10^5$ КОЕ/г, в глубинной динамике прослеживаются аналогичные тенденции. Наибольшие значения, так же как и для аммонификаторов, характерны для верхнего слоя акротелма, однако снижение численности происходит не так резко. Сезонный максимум приходится на зимний период, минимальная численность в акротелме составляет $3,0 \cdot 10^4$ КОЕ/г и приходится на июль. Такая динамика, вероятно, обусловлена переходом азота из органической формы в минеральную и обратно.

Численность грибов и ацидофильных бактерий в торфяной залежи по глубине залегания изменяется аналогичным образом в пределах от $0,2 \cdot 10^2$ до $7,4 \cdot 10^4$ КОЕ/г. Скачок численности происходит в период прогрева залежи, после весеннего паводка, и достигает максимума в июле, что примерно в 7 раз выше по сравнению с майскими значениями.

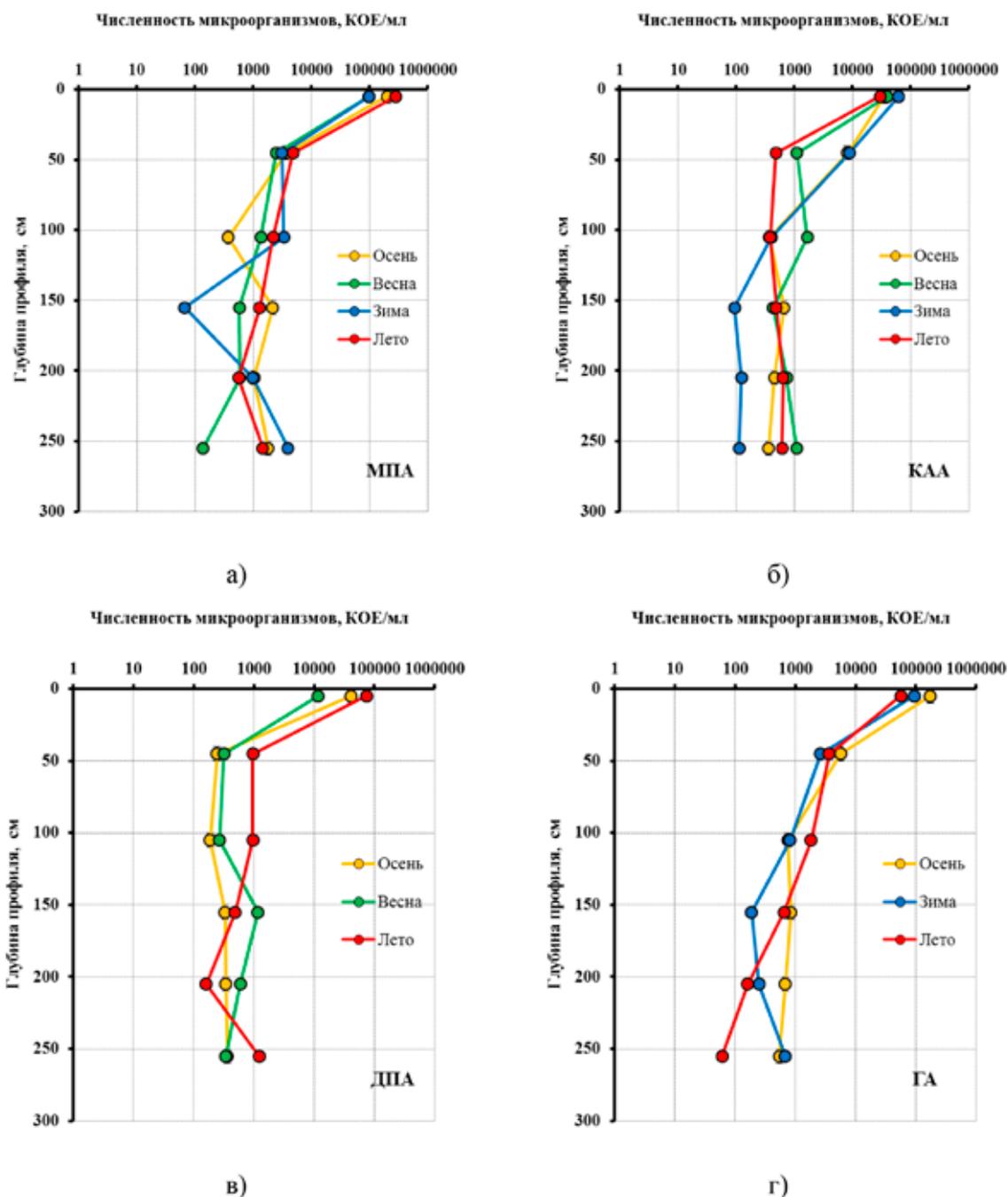


Рис. 3. Сезонная динамика изменения численности микроорганизмов по глубине залежи, выращенных на различных видах агаре: а – МПА (мясо-пептонный агар); б – КАА (крахмально-аммиачный агар); в – ДПА (декстрозо-пептонный агар); г – ГА (голодный агар)

Олиготрофные автохтоны, выращиваемые на голодном агаре, – единственная группа микроорганизмов, которая проявляет максимальную активность осенью в период снижения численности аммонификаторов, грибов и дрожжей, что вполне логично. Общий рост численности эвтрофных микроор-

ганизмов в летний период приводит к постепенному дефициту биогенных элементов и, как следствие, к снижению их численности, при этом олиготрофные автохтоны, напротив, при недостатке питательной среды начинают набирать численность, которая достигает предельных значений в октябре ($1,7 \cdot 10^5$ КОЕ/г).

Данные о численности микробных сообществ в верховых болотах свидетельствуют о протекании процессов микробиологической деструкции по всей глубине залежи. Однако их интенсивность значительно снижается с глубиной. Отчасти это может быть связано с высоким содержанием в верховых торфах мохового типа сфагнанов, особенно устойчивых к биодеградации в условиях кислой среды (рН = 3,7–4,9), и сфагнолов – компонентов фенольной природы, проявляющих в анаэробных условиях высокую токсичность по отношению к микроорганизмам [14]. При этом наиболее достоверно данные тенденции позволяют объяснить участие анаэробной биоты и действие экзосферментов, что требует в дальнейшем более детального изучения.

Выводы

1. Для всех морфологических групп микроорганизмов характерно увеличение относительных колебаний сезонной численности при углублении рассматриваемой залежи. При этом наиболее сильно меняется количество амминифицирующих бактерий (от 1,9 до 28,9 раза) и нитрифицирующих бактерий (от 2,1 до 18,4 раза). Олиготрофные бактерии изменяются по глубине более однородно (от 11,1 до 2,4 раза), как и грибы с ацидофильными бактериями (от 6,4 до 3,5 раза).

2. Наибольшие количественные сезонные изменения происходят в чувствительном к воздействию сезонных изменений климатических факторов молодом верхнем слое залежи (0–40 см), поскольку он напрямую подвержен действию солнечной радиации и осадков, определяющих величину колебаний уровня болотных вод. Нижележащие и в той или иной мере изолированные слои залежи, формирование которых растянуто во времени, в меньшей мере подвержены сезонным климатическим пульсациям. При этом они могут служить источником информации о влиянии долговременных климатических воздействий.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках Минобрнауки России в рамках темы № FUUW–2022–0067 «Особенности образования и диагенеза органического вещества в условиях водно-болотных экосистем Арктической зоны РФ».

Список литературы

1. Юрковская Т.К. География и картография растительности болот европейской России и сопредельных территорий. СПб.: Ботанический институт им. В.Л. Комарова, 1992. 256 с.
2. Кац Н.Я. Болота земного шара. М.: Наука, 1971. 295 с.
3. Грабовик С.И. Рост и продуктивность ценопопуляций сфагновых мхов на естественных и трансформированных болотах Карелии // Труды Карельского научного центра Российской академии наук. 2016. № 4. С. 59–69.
4. Заварзин Г.А. Цикл углерода в природных экосистемах России // Природа. 1994. 7. С. 1–15.
5. Morgalev Y.N., Lushchaeva V., Morgaleval T.G., Kolesnichenko L.G., Loiko S.V., Krickov I.V., Lim A., Raudina T.V., Volkova I.I., Shirokova L.S., Morgalev S.Y., Vorobyev S.N., Kirpotin S.N., Pokrovsky O.S. Bacteria primarily metabolize at the active layer/permafrost border in the peat core from a permafrost region in western Siberia. *Polar Biol.* 2017. Vol. 40. No. 8. P. 1645–1659. DOI: 10.1007/s00300–017–2088–1.
6. Аветова Н.А., Кузнецов О.Л., Шишконокова Е.А. Почвы олиго-мезотрофных и мезотрофных болот бореального пояса Западной Сибири: возможности геоботанической диагностики в рамках типа торфяных мезотрофных почв // Почвоведение. 2021. № 5. С. 568–581. DOI: 10.31857/S0032180X21030023.
7. Хахинов В.В., Намсараев Б.Б., Доржиева Г.С.–С., Бурюхаев С.П. Гидрохимическая и микробиологическая характеристика экосистем перешейка полуострова святой нос (озеро Байкал) // География и природные ресурсы. 2012. № 4. С. 65–71.
8. Martí M., Nilsson M.B., Danielsson A., Lindgren P.–E., Svensson B.H. Strong long-term interactive effects of warming and enhanced nitrogen and sulphur deposition on the abundance of active methanogens in a boreal oligotrophic mire. *Mires and Peat.* 2019. Vol. 24. No. 29. P. 1–14. DOI: 10.19189/MaP.2019.OMB.398.
9. Добровольская Т.Г., Звягинцев Д.Г., Чернов И.Ю., Головченко А.В., Зенова Г.М., Лысак Л.В., Манучарова Н.А., Марфенина О.Е., Полянская Л.М., Степанов А.Л., Умаров М.М. Роль микроорганизмов в экологических функциях почв // Почвоведение. 2015. № 9. С. 1087–1096. DOI: 10.7868/S0032180X15090038.
10. Звягинцев Д.Г. Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: Изд-во МГУ, 1991. 304 с.
11. Zubov I.N., Orlov A.S., Selyanina S.B., Zabelina S.A., Ponomareva T.I. Redox potential and acidity of peat are key diagnostic physicochemical properties for the stratigraphic zones of a boreal raised bog. *Mires and Peat.* 2022. Vol. 18. No. 5. P. 1–16. DOI: 10.19189/MaP.2020.GDC.StA.1987.
12. Elliott D.R., Caporn S.J.M., Nwaishi F., Nilsson R.H., Sen R. Bacterial and fungal communities in a degraded raised peatland undergoing natural and managed re-vegetation. *PLoS ONE.* 2015. Vol. 10. No. 5. Art. e0124726. DOI: 10.1371/journal.pone.0124726.
13. Mosharova I.V., Ilinskii V.V., Akulova A.Y., Mosharov S.A. Ecological-microbiological studies of Lake Beloe in winter and spring with the use of innovation test-systems. *Water Resources.* 2019. Vol. 46. No. 6. P. 959–965. DOI: 10.1134/S0097807819060149.
14. Добровольская Т.Г., Головченко А.В., Звягинцев Д.Г. Функционирование микробных комплексов в верховых торфяниках – анализ причин медленной деструкции торфа. М.: Товарищество научных изданий КМК, 2013. 128 с.
15. Инишева Л.И. Динамика биохимических процессов и окислительно-восстановительное состояние в геохимически сопряженных ландшафтах олиготрофного болота // Почвоведение. 2016. № 4. С. 505–513. DOI: 10.7868/S0032180X16040055.