

## СОДЕРЖАНИЕ И ВАРИАЦИИ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ УГЛЕРОДА И АЗОТА В ПОЛИГОНАЛЬНЫХ ТОРФЯНИКАХ У ПОСЕЛКА НОВЫЙ ПОРТ, ПОЛУОСТРОВ ЯМАЛ

А. К. Васильчук<sup>1</sup>, Ю. К. Васильчук<sup>1</sup>, Н. А. Буданцева<sup>1</sup>, А. П. Гинзбург<sup>2</sup>, В. А. Литвинский<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова (Москва, Российская Федерация)

<sup>2</sup> Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (Пушино, Российская Федерация)

<sup>3</sup> Палеонтологический институт имени А. А. Борисяка РАН (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 23 октября 2025 г.

### Для цитирования

Васильчук А. К., Васильчук Ю. К., Буданцева Н. А. и др. Содержание и вариации стабильных изотопов углерода и азота в торфе плоскобугристых полигональных торфяников у поселка Новый Порт, полуостров Ямал // Арктика: экология и экономика. — 2026. — Т. 16, № 2. — С. 204—214. — DOI: 10.25283/2223-4594-2026-2-204-214.

*Разрезы плоскобугристых полигональных торфяников исследованы на первой и второй лагунно-морских террасах на юго-востоке полуострова Ямал. Определены радиоуглеродный возраст торфа, содержание органического углерода и азота и изотопный состав этих элементов. Установлена хронология формирования торфяников: их рост происходил от 8840 до 7050 календарных (кал.) лет назад на второй террасе и от 9820 до 7670 кал. лет назад на первой. Скорость накопления торфа составила 0,6–1,9 мм/год. Отсутствие переходного слоя продемонстрировало максимальное протаивание торфяников в результате глобального потепления.*

**Ключевые слова:** голоцен, полигональный торфяник, динамика биогенных элементов, палеоклимат, радиоуглерод, стабильные изотопы углерода и азота, событие 8ка, Ямал.

### Введение

Прогнозные климатические сценарии требуют глубокого понимания глобальных циклов углерода С и азота N, а также природы обратных связей между биогеохимическими процессами и климатом [1]. Северные торфяники — особенно важный компонент этих циклов, учитывая их роль в качестве поглотителя углерода за последние 11,7 тыс. лет [2]. Многолетнемерзлые торфяники занимают площадь около 1,7 млн км<sup>2</sup> и содержат заметную долю общего запаса органического углерода в почве. Содержание углерода и азота, а также изотопная характеристика этих элементов в настоящее время активно используются при изучении торфяников для выявления степени и интенсивности разложения торфа в процессе деградации многолетнемерзлых пород в результате потепления климата [3—5]. Изучение многолетнемерзлых торфяников позволило устано-

вить, что в них содержание азота значительно ниже, чем в талых торфяниках [6], что явилось основанием для использования значения содержания азота в торфяниках в палеоэкологических исследованиях в качестве маркера существования многолетней мерзлоты. В ненарушенных торфяных болотных системах выделяются два слоя: акротельм, содержащий живые растения, и катотельм, содержащий мертвый растительный материал. Между ними, как правило, находится промежуточный слой мезотельм. Исследования стабильных изотопов углерода и азота во многих случаях позволяют определить положение границ этих слоев. В торфяниках вне зоны развития многолетнемерзлых пород значение отношения C/N обычно низкое и уменьшается с глубиной, поскольку происходит потеря углерода за счет анаэробного распада в катотельме [6]. В многолетнемерзлых торфяниках процессы разложения замедлены или прекращены, и высокое значение отношения C/N в торфе было предложено в качестве индикатора наличия многолетнемерзлых пород [7].

Взаимосвязь между  $\delta^{15}\text{N}$  и  $\text{C/N}$  используется как показатель для выявления деградации и аградации многолетней мерзлоты в субарктических торфяниках [5]. Кроме того, было установлено [6], что значения отношения  $\text{C/N}$  указывают на степень разложения торфа. С увеличением степени разложения в первую очередь происходит потеря углерода, в то время как содержание азота почти не изменяется, и отношение  $\text{C/N}$  уменьшается. Для криолитозоны обогащение торфа изотопом  $^{15}\text{N}$  наряду с уменьшением соотношения  $\text{C/N}$  указывает на нарушение круговорота азота, т. е. на потерю более легкого изотопа  $^{14}\text{N}$  [5; 8]. Это происходит при улучшении условий летнего сезона, когда интенсифицируется разложение торфа, и обычно совпадает с переходом от омбротрофных к минеротрофным условиям, характеризующим также переход к доминированию сосудистых растений.

Объект нашего изучения — плоскобугристые полигональные торфяные массивы, которые встречаются в основном в зоне сплошного развития многолетнемерзлых пород, иногда присутствуют и в зоне их прерывистого распространения, часто приурочены к участкам развития голоценовых повторно-жильных льдов в торфяниках. Мощность торфяников чаще всего составляет 0,5—1,5 м, но иногда наблюдаются торфяные линзы мощностью до 3—4 м. Изучение торфяников Нового Порта началось в 1938—1939 гг. [9]. Был исследован ботанический состав торфа, получены палинологические данные, определен состав раковинных амеб. Н. Я. Кац и С. В. Кац исследовали торфяное обнажение в 8 км выше поселка Новый Порт. В основании торфяника были обнаружены пни, иголки и шишки ели, древесина лиственницы, среди ботанических остатков в торфе определены остатки хвоща, вахты, видов осок, характерных для северной тайги. По палинологическим данным выделены два этапа: верхний с доминированием пыльцы сосны и нижний с доминированием пыльцы ели [9].

Цель статьи — датировать время накопления торфа, исследовать содержание углерода и азота, а также и вариации стабильных изотопов углерода и азота в торфе плоскобугристых полигональных торфяников у поселка Новый Порт, проследить экологические особенности развития торфяников и закономерности распределения изученных элементов, охарактеризовать изменения их содержания в условиях глобального изменения климата — похолодания 8.2ка.

#### Район, объекты и методы исследования

Новый Порт считается одним из самых холодных мест Ямала в зимний период: абсолютный минимум температуры воздуха, наблюдавшийся здесь, достиг  $-50,9^\circ\text{C}$  в 1971 г. С 2010 по 2020 гг. среднегодовая температура составила  $-5,6^\circ\text{C}$ . Самым холодным месяцем считается февраль, средняя температура воздуха за месяц нередко опускается ниже  $-30^\circ\text{C}$ , а в самом теплом месяце июле среднемесячная

температура составляет  $10\text{—}15^\circ\text{C}$ . Ход среднегодовых температур воздуха в период с 1936 г. до настоящего времени не демонстрирует видимого роста или снижения как в зимний, так и в летний периоды [10]. Среднегодовое количество осадков с 2010 по 2022 гг. составило 180,6 мм. Мощность многолетнемерзлых пород (ММП) достигает 290—300 м, в основном здесь сплошное распространение ММП по латерали и вертикали. Температура ММП на глубине нулевых годовых колебаний варьирует около  $-5\text{...}-4^\circ\text{C}$  [11]. Глубина сезонного оттаивания отложений изменяется от 0,4—0,5 до 0,7 м (площадка CALM). В толще первой террасы вблизи поселка Новый Порт И. П. Новиков [12] описал сингенетическую ледяную жилу высотой 7 м и шириной около 1—1,5 м. Н. И. Пьявченко [13] отмечал, что продолжающийся рост сингенетических ледяных жил с валиковыми полигонами на поверхности наблюдается в низинных торфяниках на широте Нового Порта. Район Нового Порта характеризуется распространением двух основных типов почв — глееземов и торфяно-глееземов [14]. На изученных участках почва торфяная эуτροφная мерзлотная. Окружающая поселок территория относится к подзоне южных гипоарктических тундр или Кольско-Большеземельско-Тазовскому биому [15]. Локальная флора района Нового Порта включает 193 вида и подвида, относящихся к 107 родам и 44 семействам, что составляет 47,1% выявленной флоры полуострова Ямал [16].

Отбор образцов производился из защищенной стенки разреза, в случае отбора ниже слоя сезонного таяния (СТС) торф зачищался до мерзлой поверхности. Для определения  $^{14}\text{C}$  возраста образцы торфа массой 200—300 г отбирались в стерильные полиэтиленовые пакеты. Для определения содержания органического углерода и азота и их изотопного состава из разрезов отбирались образцы торфа и почвенных горизонтов объемом  $1\text{—}0,5\text{ см}^3$ . Пробы подвергались сублимационной сушке в течение двух дней, затем измельчались в агатовой ступке и вновь высушивались при  $60^\circ\text{C}$ . Высушенные образцы взвешивались с точностью до пятого знака. Измерения содержания органического углерода и азота и величин  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{15}\text{N}$  выполнены в Кабинете приборной аналитики Палеонтологического института им. А. А. Борисяка РАН. Определение радиоуглеродного возраста производилось методом жидкостной сцинтилляции в лаборатории геоморфологических и палеогеографических исследований полярных регионов и Мирового океана Санкт-Петербургского государственного университета.

Разрезы торфяников исследованы в сентябре 2023 г. на первой и второй лагунно-морских террасах на юго-востоке полуострова Ямал в районе Нового Порта (рис. 1а, 1б).

Разрез плоскобугристого торфяника НП-23-1 ( $67^\circ42'22,82''$  с. ш.,  $72^\circ49'02,73''$  в. д.) был обследован в шурфе в 3 км к северо-западу от центра Нового Порта на плоской сниженной поверхности второй

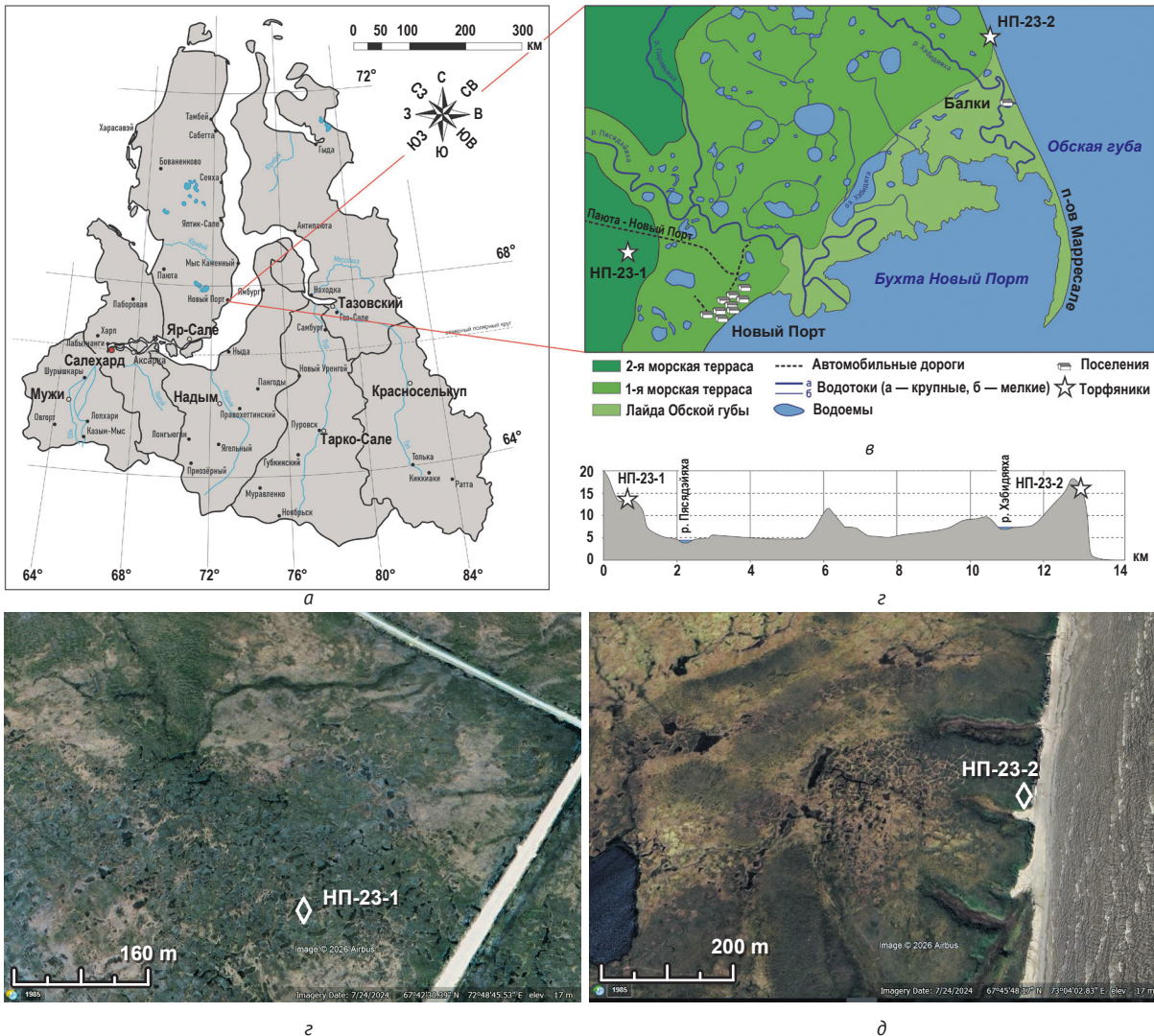


Рис. 1. Расположение ключевых участков: в 3 км к северо-западу от центра Нового порта (а) и в 8 км к северу от южной оконечности полуострова Марресале на восточном побережье Обской губы (б); профиль рельефа поверхностей морских террас (в), полигональный рельеф на ключевых участках (г, д) с указанием расположения разрезов. Составлено авторами на картографической основе Google Earth (<https://earth.google.com>)

Fig. 1. Location of key areas: 3 km north-west from the center of the village of Novy Port (a), and 8 km north from the southern tip of the Marresale Peninsula on the east coast of the Gulf of Ob (b); the sea terrace relief profile (c), and the polygonal relief at key areas (d, e) indicating the locations of the sections. Compiled by the authors using Google Earth cartographic data (<https://earth.google.com/web>)

морской террасы Обской губы Карского моря на пологом склоне котловины спущенного озера в ландшафтных условиях заболоченной южной мелкоерниковой осоково-багульниковой тундры в пределах полигонального торфяного массива на высоте 13 м над уровнем моря (см. рис. 1в). Мощность оттаявшего слоя торфа составляет 0,5 м, торф темно-бурый слабой и средней степени разложения. С глубины 0,5 м торф мерзлый темно-бурый средней степени разложения, криотекстура массивная (рис. 2а). Плоскобугристый торфяник НП-23-2 (67°45'53,41" с. ш., 73°04'16,98" в. д.) вскрыт на бровке обрывистого абразионного склона первой морской террасы Обской губы Карского моря на высоте 16 м над уровнем моря в ландшафтных условиях типичной бруснично-багульниковой тундры, на участке раз-

вит полигональный рельеф (см. рис. 1г). Под очень тонким живым надпочвенным дикраново-лишайниково-сфагновым покровом залегаet слабо гумифицированная (5—15%) дернина, сфагновая с корешками вересковых и политрихумом. Мощность оттаявшего слоя красновато-бурого торфа средней степени разложения составляет 0,52 м. В интервале 0,52—1,80 м торф мерзлый, темно-бурый, криотекстура порфи́ровая и базальная, степень разложения высокая и средняя (см. рис. 2б), криотурбации отсутствуют.

### Результаты

Содержание органического углерода и азота

Содержание органического углерода  $C_{org}$  (%) и азота N (%), а также значения  $\delta^{13}C$  (‰) и  $\delta^{15}N$  (‰)

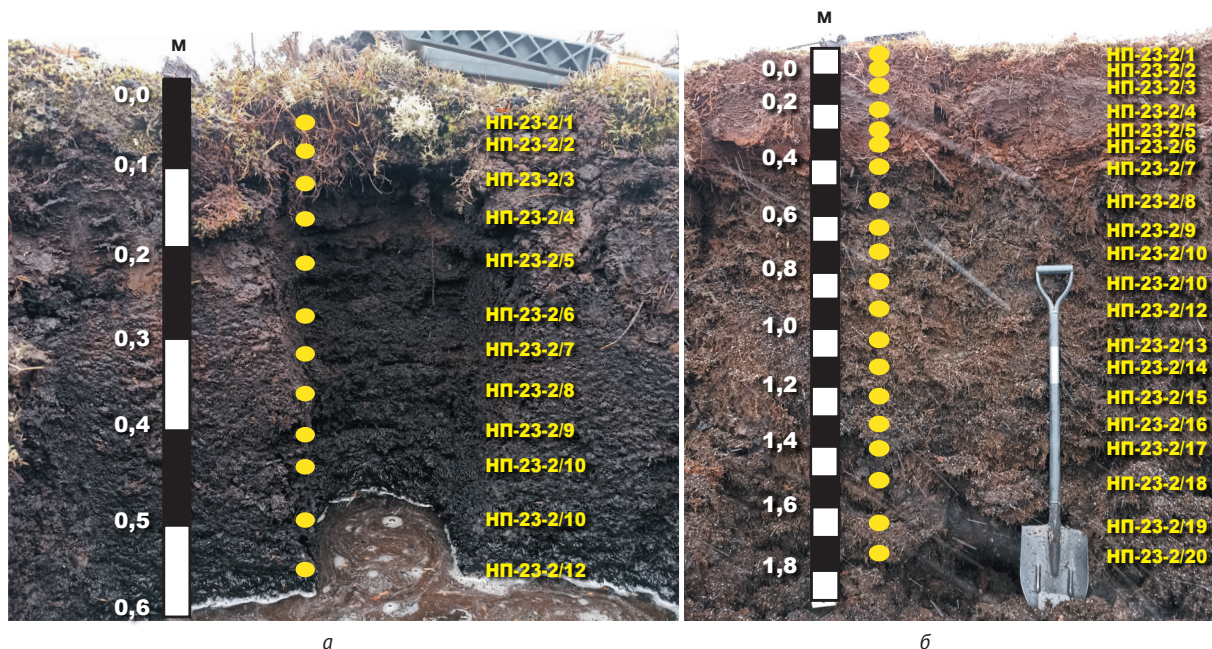


Рис. 2. Отбор образцов в разрезах торфяников НП-23-1 (а) и НП-23-2 (б)  
Fig. 2. Sampling in peat bog sections NP-23-1 (a) and NP-23-2 (b)

получены для 31 образца торфа; определены значения молярного отношения C/N.

В разрезе торфяника **НП-23-1** среднее содержание  $C_{\text{орг}}$  составляет 47,18% и находится в диапазоне 49,73—39,27%. Среднее содержание N составляет 2,64% и находится в диапазоне 3,15—1,51%. Среднее значение  $\delta^{13}\text{C}$  составляет

–28,15‰, максимальное — –27,13‰, минимальное — –29,22‰; среднее значение  $\delta^{15}\text{N}$  составляет 2,04‰, максимальное — 4,03‰, минимальное — 0,67‰ (рис. 3).

**Торфяник НП-23-2** характеризуется резкими колебаниями значений изученных характеристик (рис. 4). Среднее содержание  $C_{\text{орг}}$  составляет

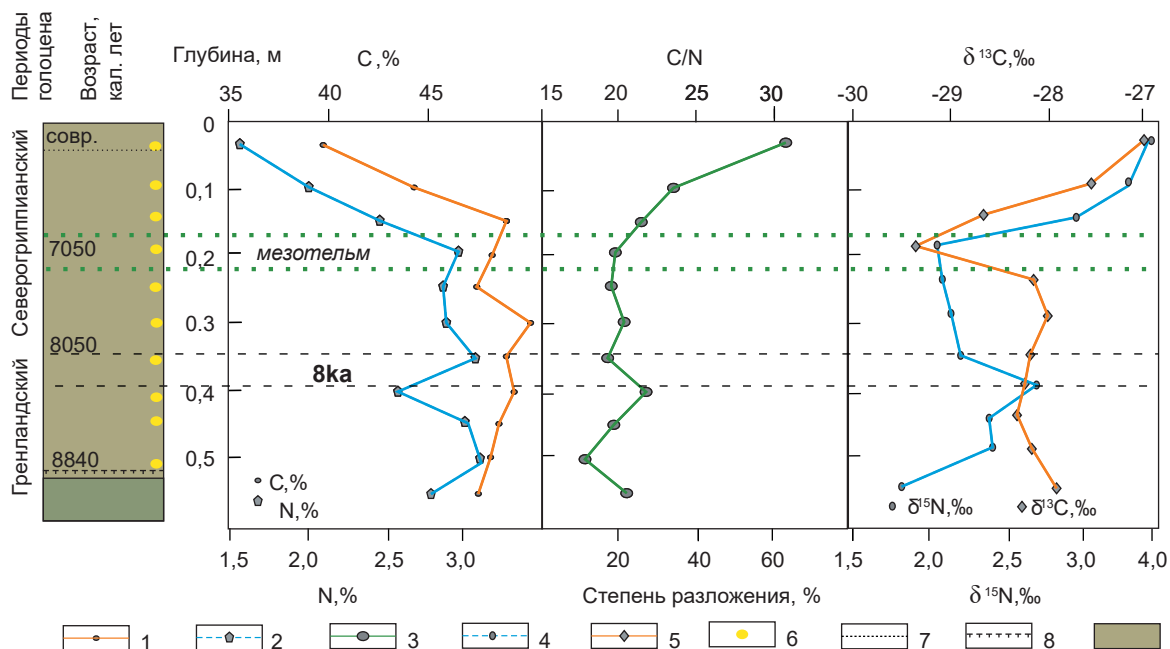


Рис. 3. Содержание углерода, азота и значения  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{15}\text{N}$  в разрезе НП-23-1: 1 –  $C_{\text{орг}}$  (%), 2 – N (%), 3 – C/N, 4 –  $\delta^{15}\text{N}$  (‰), 5 –  $\delta^{13}\text{C}$  (‰), 6 – точки отбора образцов, 7 – граница между отложениями разных периодов голоцена, 8 – слой сезонного таяния (СТС), 9 – торф темно-бурый талый, 10 – торф темно-бурый мерзлый  
Fig. 3. Carbon, nitrogen content and  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values in section NP-23-1: 1 –  $C_{\text{орг}}$  (%), 2 – N (%), 3 – C/N, 4 –  $\delta^{15}\text{N}$  (‰), 5 –  $\delta^{13}\text{C}$  (‰), 6 – sampling points, 7 – boundary between sediments of different periods of the Holocene, 8 – seasonal thaw layer (STL), 9 – dark brown thawed peat, 10 – dark brown frozen peat

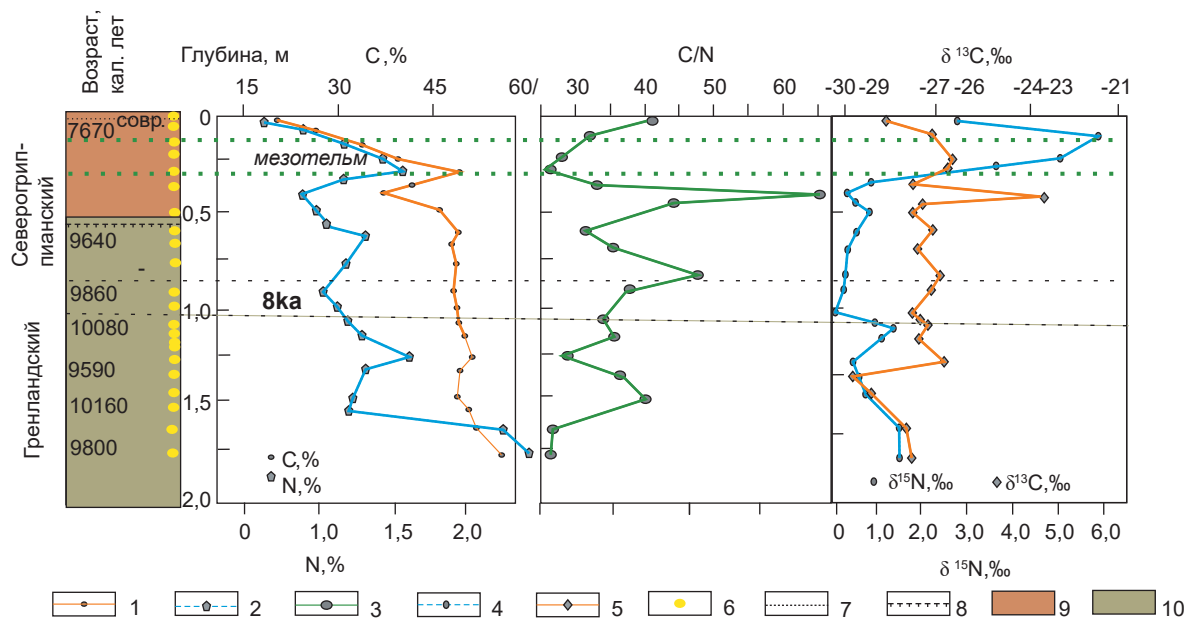


Рис. 4. Содержание углерода и азота и значения  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{15}\text{N}$  в разрезе НП-23-2: 1 –  $C_{\text{орг}}$  (%), 2 – N (%), 3 – C/N, 4 – значения  $\delta^{15}\text{N}$  (‰), 5 – значения  $\delta^{13}\text{C}$  (‰), 6 – точки отбора образцов, 7 – граница между отложениями разных периодов голоцена, 8 – слой сезонного таяния (СТС), 9 – торф красновато-бурый, 10 – торф темно-бурый  
 Fig. 4. Carbon and nitrogen content and  $\delta^{13}\text{C}$  and  $\delta^{15}\text{N}$  values in section NP-23-2: 1 –  $C_{\text{орг}}$  (%), 2 – N (%), 3 – C/N, 4 –  $\delta^{15}\text{N}$  (‰), 5 –  $\delta^{13}\text{C}$  (‰), 6 – sampling points, 7 – boundary between sediments of different periods of the Holocene, 8 – seasonal thaw layer (STL), 9 – reddish-brown peat, 10 – dark brown peat

44,14% и находится в диапазоне 53,37—15,72%; среднее содержание N составляет 1,51% и находится в диапазоне 0,44—2,50%; среднее значение  $\delta^{13}\text{C}$  составляет -27,41‰, максимальное — -23,78‰, минимальное — -29,46‰; среднее значение  $\delta^{15}\text{N}$  составляет 1,49‰, максимальное — 5,77‰, минимальное — -0,01‰.

**Абсолютный возраст торфа**

Радиоуглеродный возраст получен для 12 образцов торфа (табл. 1). Возраст торфяника НП-23-1 определен в интервале 8840—7050 календарных (кал.) лет, возрастные инверсии отсутствуют. Поскольку основание торфяника не было исследовано, время начала накопления торфа не определено. В разрезе торфяника НП-23-2 имеются небольшие возрастные инверсии (см. табл. 1). Хотя инверсионные даты не кардинально различаются в пределах доверительных интервалов, для определения динамики роста торфа они исключены из рассмотрения по принципу выбора наиболее молодого ряда  $^{14}\text{C}$  датировок для мерзлых толщ [17]. Возраст этого торфяника определен в интервале 9820—7670 кал. лет.

**Обсуждение**

*Распределение углерода и азота в разрезах торфяников*

**Торфяник НП-23-1.** Содержание углерода (39,27%) и азота (1,51%) в исследованной торфяной залежи минимально на поверхности торфяни-

ка (см. рис. 3). Содержание углерода в разрезе не превышает 50%, что связано с тем, что в изученном разрезе отсутствует разложившаяся древесина [19]. Значения  $\delta^{13}\text{C}$  по разрезу слабо варьируют от -27,95 до -29,18‰. Максимум наблюдается в самом верхнем слое торфа (-27,13‰); среднее значение  $\delta^{13}\text{C}$  составляет -28,15‰. В верхних 0,15 м значения  $\delta^{15}\text{N}$  составляют 2,94—4,03‰, а в интервале 0,2—0,55 м заметно снижаются до 0,67—1,85‰. Максимальное значение отношения C/N, равное 26,0, отмечено в самом верхнем горизонте, что обусловлено минимальным содержанием азота (см. рис. 3). Рост содержания  $C_{\text{орг}}$  наблюдается сверху вниз по профилю, на глубине 0,25—0,30 м отмечается небольшое снижение содержания  $C_{\text{орг}}$  в обоих торфяниках. Уже с глубины 0,2 м значение отношения C/N практически стабильно и колеблется около 20, среднее значение C/N составляет 21,4, что, очевидно, отражает примерно одинаковую степень разложения торфа (50—60%). Содержание  $C_{\text{орг}}$  стабильно держится в пределах 48—49%, что типично для торфяников, в сложении которых доминируют сфагновые мхи [20]. При переходе торфа из талого состояния в мерзлое отмечается увеличение содержания как углерода, так и азота, при этом значение C/N снижается до 17,6, сохранность растительных остатков здесь гораздо выше, а степень разложения составила 40%. Границу верхнего мезотельма в разрезе проследить не удалось, так как отсутствует характерное снижение значения C/N, соответствующее пику содержания  $\delta^{15}\text{N}$  [21]. Тем не менее

Таблица 1.  $^{14}\text{C}$  датировки торфа

Table 1.  $^{14}\text{C}$  dating of peat

Лабораторный индекс	Полевой номер	Глубина отбора, м	$^{14}\text{C}$ возраст, лет назад	Калиброванный возраст, кал. лет назад *	
				Возрастной интервал $2\sigma$ с вероятностью 95,4%	Медианное значение $1\sigma$
LU-11315	НП-2023-1/1	0—0,05	Современный	—	—
LU-11316	НП-2023-1/4	0,15—0,2	6160±90	7270—6790	7050±120
LU-11317	НП-2023-1/7	0,3—0,35	7220±80	8200—7860	8040±90
LU-11318	НП-2023-1/10	0,45—0,5	7990±100	9130—8550	8840±150
LU-11319	НП-2023-2/2	0,03—0,1	Современный	—	—
LU-11320	НП-2023-2/5	0,25—0,3	6820±90	7920—7500	7670±90
LU-11321	НП-2023-2/8	0,52—0,6	8660±70	9900—9520	9640±100
LU-11322	НП-2023-2/11	0,8—0,9	8810±80	1070—9550	9860±160
LU-11323	НП-2023-2/13	1,0—1,1	8990±120	10490—9690	10080±180
LU-11324	НП-2023-2/16	1,3—1,4	8590±90	9900—9430	9590±110
LU-11325	НП-2023-2/18	1,5—1,6	9020±100	10490—9770	10160±160
LU-11326	НП-2023-2/20	1,7—1,8	8770±90	10150—9540	9800±170

\* Значения календарного возраста приведены по результатам использования калибровочной программы «OxCal 4.4.4» (<https://c14.arch.ox.ac.uk>) на основании и калибровочной кривой «IntCal 20» [18].

границу между акротельмом и катотельмом можно провести в интервале 0,18—0,22 м (мезотельм) на том основании, что в этом интервале содержание и углерода, и азота переходит в практически стабильное состояние.

**Торфяник НП-23-2.** В этом торфянике содержание азота заметно ниже, чем в торфянике НП-23-1 (см. рис. 4), в то время как содержание углерода колеблется около 48—49%, т. е. не сильно отличается от торфяника НП-23-1. На глубинах 1,3 и 1,8 м содержание углерода превышает 50%. Можно отметить, что при накоплении торфа в соответствующих этим глубинам временных интервалах торф переходил в многолетнемерзлое состояние несколько быстрее, т. е. протаивание торфа летом не компенсировало промерзание зимой. Среднее значение отношения C/N в разрезе этого торфяника составляет 36,41, максимальное значение отношения C/N на глубине 0,52 м — 65,8, оно совпадает с минимальным содержанием азота, минимальное значение на глубине 0,25 м составляет 25,2. Значения  $\delta^{13}\text{C}$  по разрезу варьируют от  $-23,78$  до  $-29,46\text{‰}$ , средняя величина —  $-27,41\text{‰}$ . Максимум отмечен на глубине 0,52 м и составил  $-23,78\text{‰}$ . На этой глубине находится подошва сезонно-талого слоя, очевидно, что протаивание торфяника привело к активизации разложения органики, а это, в свою очередь, отразилось на увеличении значений  $\delta^{13}\text{C}$ .

Для индикации положения мезотельма предложено использовать пиковые значения  $\delta^{15}\text{N}$  [21], сопровождающиеся снижением значения C/N. Это объясняется оптимальным соотношением флоры, грибов и микроорганизмов, активно использующих азот на уровне верхнего мезотельма. Предпочитая более легкий изотоп азота  $^{14}\text{N}$ , микрофлора мезотельма в процессе жизнедеятельности повышает содержание более тяжелого изотопа  $^{15}\text{N}$ . В нижнем мезотельме микробное разложение в целом снижается, в анаэробном катотельме значения  $\delta^{15}\text{N}$  стабилизируются [21]. В данном разрезе верхний мезотельм расположен в интервале 0,25—0,30 м, здесь прослеживаются рост значений  $\delta^{15}\text{N}$  ( $3,11\text{‰}$ ) и снижение значений отношения C/N до 25,2—28,5. В интервале 1,1—1,3 м локальный максимум содержания  $\text{C}_{\text{орг}}$  (51,03%) сопровождается ростом содержания N (2,14%), а также локальными максимумами значений  $\delta^{13}\text{C}$  и  $\delta^{15}\text{N}$ . Значения  $\delta^{13}\text{C}$  ниже  $-29\text{‰}$  зафиксированы в интервале глубин 1,4—1,6 м. Согласно результатам изучения изотопного состава растений в тундрах Ямала, вариации значений  $\delta^{13}\text{C}$  даже в одних и тех же видах растений, произрастающих в сухих условиях вдали от моря, составляют от  $-30,1$  до  $-26,9\text{‰}$ , вблизи моря — от  $-29,5$  до  $-26,6\text{‰}$ , во влажных условиях низин вблизи моря — от  $-29,2$  до  $-26,3\text{‰}$ , вдали от моря — от  $-29,9$  до  $-28,9\text{‰}$  [22]. Вариации содержания  $\delta^{13}\text{C}$

также могли быть обусловлены изменением положения торфяника относительно береговой линии и изменением количества аэрозолей, поступающих с акватории Обской губы.

*<sup>14</sup>C возраст мерзлых торфяников и скорость накопления торфа*

Плоскобугристые полигональные торфяники широко распространены на Ямале и хорошо датированы. Торфяники, которые накапливались одновременно с торфяниками у поселка Новый Порт, находятся на широте от 67° до 70° с. ш. и от 66° до 73° в. д. преимущественно на восточном побережье Ямала. В среднем скорость накопления торфа в гренландский период редко превышала 0,5 мм/год. Максимальная скорость накопления торфа отмечена в начале северогриппанского периода для торфяника в долине реки Щучья — 3,5 мм/год [23]. В пределах датированной от 8840 до 8050 кал. лет назад толщи торфяника НП-23-1 скорость роста торфа не превышала 1 мм/год, а во временном интервале 8050—7050 кал. лет назад скорость увеличилась до 1,5 мм/год. Учитывая скорость роста торфа в торфянике НП-23-1 в интервале 8840—8050 кал. лет назад, можно определить границу между гренландским и северогриппанским периодами голоцена (8200 кал. лет назад) на глубине примерно 0,4 м. В торфянике НП-23-2 скорости накопления торфа заметно различаются на разных этапах накопления торфа. Нижняя часть толщи, датированная от 9800 до 9590 кал. лет назад, накапливалась с довольно высокой скоростью 1,9 мм/год, темп накопления торфа в верхней части толщи в интервале 9590—7670 кал. лет назад замедлился, скорость накопления составила 0,6 мм/год. По результатам датирования границу между торфом, относящимся к гренландскому и северогриппанскому периодам голоцена, можно приблизительно провести на глубине 0,7—0,8 м. Инверсии датировок могут быть обусловлены нарушением стратиграфии торфяной залежи при неоднократных переходах между многолетнемерзлым и талым состояниями из-за криотурбированности. Подобные инверсии в близком к полученному возрастном диапазоне отмечены в некоторых разрезах полигональных торфяников, например, на Тазовском полуострове на правобережной части реки Нёляко-Собетъяхатарка [24]. Согласно полученным <sup>14</sup>C датировкам, скорость накопления торфа в основании торфяника там составила 0,42—0,55 мм/год в течение гренландского и в начале северогриппанского периодов.

*Событие 8.2ка*

Поскольку по разрезам торфяников Нового Порты мы получили ряды <sup>14</sup>C датировок, соответствующих гренландскому и северогриппанскому периодам голоцена, можно проследить изменения, связанные с глобальным похолоданием 8.2ка, которому соответствует граница между этими периодами голоцена. По шкале времени GICC05 длительность

этого события составила 160 лет, на самую холодную фазу пришлось 70 лет [25]. Резкое изменение климата произошло, когда климатическая система преодолела некий порог, что вызвало переход к новому, более или менее устойчивому состоянию. Изменения были намного масштабнее, чем типичная изменчивость климата до и после этого события. Климатическое событие, произошедшее около 8200 лет назад, привело к тому, что во многих регионах Северного полушария установились холодные и сухие условия, особенно в зимний сезон [25]. Однако переход от гренландского к северогриппанскому периоду около 8200 лет назад в хронологии, установленной по ширине годовых колец лиственницы сибирской, протяженностью 8768 лет для севера Западной Сибири, каким-либо заметным событием не отмечен [26]. Это похолодание не прослеживается по данным палинологического и карпологического анализов в разрезе подробно изученного и датированного мерзлого торфяника, расположенного неподалеку от Нового Порты на западном берегу озера Нюлсавеито [27]. Можно утверждать, что данное похолодание на температурном режиме летнего периода отразилось слабо, несмотря на арктическую амплификацию (усиление амплитуды температурных колебаний в Арктике по сравнению с Северным полушарием в целом) [28]. Установлено, что в арктических экосистемах многие важные функциональные изменения, включая смену микробных сообществ и изменения в процессах круговорота азота, происходят во время сезонных переходных периодов и в холодный период [29]. Повышение температуры воздуха, а также повышение температуры почвы зимой в Арктике потенциально способствуют повышению микробной активности в течение зимнего сезона, когда в основном производится минерализация азота [7]. Повышенная минерализация азота в холодное время года приводит к повышению доступности азота в почве в течение активного летнего сезона, что может по-разному влиять на микробиологические процессы в почве в начале и в разгар летнего сезона. Темпы минерализации азота в торфяниках существенно снижаются при снижении зимней температуры и уменьшении толщины снежного покрова [7], что было характерно для события 8.2ка. Следовательно, событию 8.2ка может соответствовать существенно пониженное значение  $\delta^{15}\text{N}$  и, возможно, но не обязательно, несколько повышенное содержание азота, поскольку активность микроорганизмов снижена из-за неблагоприятных условий. В разрезе торфяника НП-23-2 этим условиям соответствует минимальное значение  $\delta^{15}\text{N}$ , равное  $-0,01\text{‰}$  на глубине 0,8—0,9 м. По результатам расчета скорости накопления торфа уровень, примерно соответствующий дате 8200 лет, находится на отметке 0,7—0,8 м. Таким образом, границу между отложениями торфа северогриппанского и гренландского периодов можно провести на глубине 0,8 м. В разрезе торфяника НП-23-1 таких особенностей распределения не выявлено. Со-

гласно данным радиоуглеродного анализа, торф на глубине 0,4 м соответствует возрасту 8200 кал. лет назад, т. е. событию, которое отделяет гренландский период от северогриппианского. В интервале 0,4—0,45 м отмечены локальный максимум значения C/N и минимальное значение содержания углерода, связанные предположительно со снижением биопродуктивности. Это может свидетельствовать об аградации многолетнемерзлых пород [7], что было характерно для холодного события 8.2ка. Очевидно, что изменения климата опосредованно отражались на сообществах редуцентов (деструкторов) органического вещества через изменения мерзлотного и гидрологического режимов торфяников.

#### *Переходный и промежуточный слои в разрезах мерзлых торфяников*

Для мерзлых торфяников между ежегодно оттаивающим сезонно-талым слоем и многолетнемерзлыми породами Ю. Л. Шур [30] выделил два слоя — переходный и промежуточный. Переходный слой локализуется в нижней части СТС. Это слой, который оттаивает не ежегодно, а только в экстремально теплый летний сезон, и не менее трех лет находится в мерзлом состоянии. Промежуточный слой располагается в верхней части многолетнемерзлых пород и по сути является реликтовым переходным слоем, который фиксирует увеличение глубины СТС. По Ю. Л. Шуру, для промежуточного слоя характерны повышенная льдистость, специфические атакситовые, сложнослоистые и поясковые криогенные текстуры с преобладанием вертикальных шлиров льда, криотурбированность слоя. Дополнительно для межполигональных понижений торфяников Е. С. Королева с соавторами [31] в качестве признаков промежуточного слоя добавили увеличение плотности промежуточного слоя за счет повышенной льдистости, наличие линзовидной, слоистой шлировой (поясковой) криогенных текстур. Наши исследования торфяников производились в период максимального протаивания в сентябре 2023 г., когда средняя температура летних месяцев и сентября, по данным метеостанции Новый Порт, была одной из самых высоких в XXI в. В 2011—2023 гг. отмечалось увеличение длительности сезона положительных температур за счет повышения средней температуры мая, июня и сентября, а также максимальных значений средней температуры июля за весь период наблюдений в 2016 г. (18°C) [10]. Шурф в торфянике НП-23-1 заложен в центре полигона, глубина протаивания составила 0,5 м. Логично было бы предположить, что под толщей талого торфа залегают переходный и промежуточный слои. Однако под слоем СТС торф имеет массивную криотекстуру, что свидетельствует о том, что максимальное протаивание для данного торфяника очевидно привело к исчезновению и переходного, и промежуточного слоев. То есть это тот самый случай, когда в результате глубокого протаивания переходный и промежуточный слои перестали выполнять буферную

функцию. У торфяника НП-23-2 глубина протаивания составила на момент исследования 0,52 м. Под слоем СТС до глубины 0,80 м наблюдается слой с базальной криотекстурой, характерной для всего разреза, криотурбированность или сложнослоистые криогенные структуры отсутствуют, что свидетельствует о том, что это и есть максимальная глубина протаивания — переходный и промежуточный слои здесь очевидно тоже не прослеживаются.

#### **Выводы**

1. Накопление изученных торфяников в районе поселка Новый Порт согласно  $^{14}\text{C}$  датировкам относится к гренландскому и северогриппианскому периодам голоцена: возраст торфяника НП-23-1 определен в интервале 8840—7050 кал. лет, возраст торфяника НП-23-2 — в интервале 9820—7670 кал. лет.

2. Изотопные показатели в торфяниках Нового Порта имеют корреляционное значение для уточнения границ голоцена, а также отражают экологические условия роста торфа и позволяют проследить границу между акротельмом и катотельмом.

3. Граница между гренландским и северогриппианскими периодами, соответствующая событию 8.2k, в торфянике НП-23-1 определена на глубине 0,4 м, а в торфянике НП-23-2 — на глубине 0,7—0,8 м. Глобальное похолодание 8.2ка отразилось в основном на снижении минерализации азота из-за низкой температуры в зимний и переходные сезоны (что подтверждается резким снижением значений  $\delta^{15}\text{N}$ ) и практически не зафиксировано для летнего сезона в южной части полуострова Ямал; для события 8.2ка были характерны малоснежные и холодные условия зимнего сезона.

4. Граница между акротельмом и катотельмом (мезотельм) в торфянике НП-23-1 фиксируется переходом в практически стабильное состояние значений C/N (около 20) ниже 0,2 м. Положение мезотельма в торфянике НП-23-2 определено на основании снижения значений C/N и локального пика величины  $\delta^{15}\text{N}$  в интервале 0,25—0,30 м.

5. Глубина сезонно-талого слоя в торфяниках Нового Порта в результате глобального потепления, которое отразилось на увеличении периода положительных температур в данном районе, превысила глубину переходного слоя, что привело к его исчезновению, поэтому здесь буферная функция переходного слоя не выполняется.

#### **Финансирование**

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда (грант № 23-17-00082).

#### **Благодарности**

Авторы признательны Л. П. Кузякину, Р. В. Собову, Д. М. Богатовой за помощь в полевых исследованиях.

#### **Литература/References**

1. Hugelius G., Loisel J., Chadburn S. et al. Large stocks of peatland carbon and nitrogen are vulnerable to per-

- mafrost thaw. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2020, 117 (34), pp. 20438—20446. DOI: 10.1073/pnas.1916387117.
2. Melle C., Wallenstein M., Darrouzet-Nardi A., Weintraub M. N. Microbial activity is not always limited by nitrogen in Arctic tundra soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, vol. 90, pp. 52. DOI: 10.1073/pnas.191638711761, DOI: 10.1016/j.soilbio.2015.07.023.
3. Васильчук А. К., Буданцева Н. А., Васильчук Ю. К. и др. Соотношение содержания углерода, азота и значения  $\delta^{13}\text{C}$  в полигональных ландшафтах на побережье залива Онемен // Арктика и Антарктика. — 2021. — № 1. — С. 47—64. Vasil'chuk A. C., Budanceva N. A., Vasil'chuk Yu. K., Vasil'chuk Dzh. Yu., Bludushkina L. B. The ratio of carbon and nitrogen, as well as the  $\delta^{13}\text{C}$  value, in polygonal landscapes along the coast of Onemen Bay. *Arktika i Antarktika*, 2021, no. 1, pp. 47—64 (In Russian).
4. Alewell C., Giesler R., Klaminder J., Leifeld J., Rollog M. Stable carbon isotopes as indicators for environmental change in peatlands. *Biogeosciences*, 2011, vol. 8, pp. 1769—1778.
5. Krüger J.-P., Alewell C., Minkinen K., Szidat S., Leifeld J. Calculating carbon changes in peat soils drained for forestry with four different profilebased methods. *Forest Ecology and Management*, 2016, vol. 381, pp. 29—36. DOI: 10.1016/j.foreco.2016.09.006.
6. Kuhry P., Vitt D. Fossil Carbon/Nitrogen Ratios as a Measure of Peat Decomposition. *Ecology*, 1996, vol. 77. DOI: 10.2307/2265676.
7. Schimel J. P., Bilbrough C., Welker J. M. Increased snow depth affects microbial activity and nitrogen mineralization in two Arctic tundra communities. *Soil Biology and Biochemistry*, 2004, vol. 36, iss. 2, pp. 217—227.
8. Andersson R. A., Meyers P., Hornibrook E., Kuhry P., Mörth C.-M. Elemental and isotopic carbon and nitrogen records of organic matter accumulation in a Holocene permafrost peat sequence in the East European Russian Arctic. *J. Quat. Sci.*, 2012, 27 (6), pp. 545—552. DOI: 10.1002/jqs.2541.
9. Кац Н. Я., Кац С. В. Стратиграфия торфяников Приобского Севера // Тр. комиссии по изучению четвертич. периода. — 1948. — Вып. 7. — С. 15—54. Kats N. Ya., Kats S. V. Stratigraphy of the peatlands in the Ob region of the North. *Trudy komissii po izucheniyu chetvertichnogo perioda*, 1948, iss. VII, pp. 15—54. (In Russian).
10. <http://www.pogodaiklimat.ru/history/23242.htm>.
11. Геокриология СССР. Западная Сибирь / Ред. Э. Д. Ершов. — М.: Недра, 1989. — 458 с. Geocryology of the USSR. Western Siberia. Ed. by E. D. Ershov. Moscow, Nedra, 1989, 458 p. (In Russian).
12. Новиков И. П. Формирование естественного температурного поля зоны годовых колебаний температуры (ЗГКТ) в условиях пойменного режима: на примере низовьев реки Оби: Дис. ... канд. геол.-минерал. наук. — М.: МГУ, 1973. — 137 с. Novikov I. P. The formation of the natural temperature field in the annual temperature fluctuation zone under floodplain conditions, as exemplified by the lower reaches of the Ob River. Thesis ... PhD of Geological and Mineralogical Sciences. Moscow, MSU, 1973, 137 p.
13. Пьявченко Н. И. Бугристые торфяники. — М.: Изд-во АН СССР, 1955. — 280 с. Pyavchenko N. I. Mound peatlands. Moscow, Izdatel'stvo AN SSSR, 1955, 280 p. (In Russian).
14. Михайлов И. С., Михайлов С. И. Опыт создания и содержания почвенно-экологической карты Ямало-Ненецкого автономного округа // Бюл. Почв. ин-та им. В. В. Докучаева. — 2017. — Вып. 87. — С. 55—72. — DOI: 10.19047/0136-1694-2017-87-55-72. Mikhajlov I. S., Mikhajlov S. I. The experience of creating and maintaining a soil-ecological map of the Yamal-Nenets Autonomous Area. *Byul. Pochv. in-ta im. V. V. Dokuchaeva*, 2017, iss. 87, pp. 55—72. (In Russian).
15. Белоновская Е. А., Тишков А. А. Биомная дифференциация российской Арктики // Арктика: экология и экономика. — 2023. — Т. 13, № 1. — С. 18—33. — DOI: 10.25283/2223-4594-2023-1-18-33. Belonovskaya E. A., Tishkov A. A. Biome differentiation in the Russian Arctic. *Arctic: Ecology and Economy*, 2023, vol. 13, no. 1, pp. 18—33. DOI: 10.25283/2223-4594-2023-1-18-33. (In Russian).
16. Хозяинова Н. В., Цибарт И. Н. Флора и растительность южных тундр района пос. Новый Порт (полуостров Ямал) // Вестн. экологии, лесоведения и ландшафтоведения. — 2007. — № 7. — С. 64—77. Khozyainova N. V., Tsibart I. N. Flora and vegetation of the southern tundra area of the New Port (Yamal Peninsula). *Vestn. ekologii, lesovedeniya i landshaftovedeniya*, 2007, no. 7, pp. 64—77. (In Russian).
17. Vasil'chuk Yu. K., Vasil'chuk A. C. Validity of radiocarbon ages of Siberian yedoma. *GeoResJ*, 2017, 13, pp. 83—95. DOI: 10.1016/j.grj.2017.02.004.
18. Reimer P. J., Wen A., Bard E., Bayliss A., Blackwell G., Bronk Ramsey C., Butzin M. et al. The IntCal20 Northern Hemisphere radiocarbon age calibration curve (0-55 cal ka BP). *Radiocarbon*, 2020, 62 (4), pp. 725—757. DOI: 10.1017/RDC.2020.41.
19. Novenko E. Yu., Prokushkin A. S., Mazei N. G. et al. The mid- and late Holocene peat paleoecology and hydroclimatic changes in Yenisei Siberia revealed by a high-resolution peat archive. *Quaternary International*, 2024, vol. 682, pp. 8—21. DOI: 10.1016/j.quaint.2024.01.013.
20. Прокушкин А. С., Карпенко Л. В., Токарева И. В. и др. Углерод и азот в болотах северной части Сым-Дубческого междуречья // География и природ. ресурсы. — 2017. — № 2. — С. 114—123. Prokushkin A. S., Karpenko L. V., Tokareva I. V., Korec M. A., Pokrovskij O. S. Carbon and nitrogen in the bogs of the northern part of the Siberian Interfluvium. *Geografiya i prirodnye resursy*, 2017, no. 2, pp. 114—123. (In Russian).
21. Groß-Schmolders M., von Sengbusch P., Krüger J. P., Klein K., Leifeld J., Alewell C. Switch of fungal to bacterial degradation in natural, drained and rewetted

- oligotrophic peatland reflected by  $\delta^{15}\text{N}$  and fatty acid composition. *Soil*, 2020, vol. 6, pp. 299—313. DOI: 10.5194/soil-6-299-2020.
22. Кузнецова А. О., Иванова А. А., Слагода Е. А., Тихонравова Я. В. Стабильные изотопы углерода в современных растениях урочищ ключевого участка Марре-Сале (Западный Ямал) // Арктика и Антарктика. — 2020. — № 1. — С. 57—74. — DOI: 10.7256/2453-8922.2020.1.32204.
- Kuznetsova A. O., Ivanova A. A., Slagoda E. A., Tikhonravova Ya. V. Stable carbon isotopes in modern plants in the tracts of the key Marre-Sale site (Western Yamal). *Arktika i Antarktika*, 2020, no. 1, pp. 57—74. (In Russian).
23. Vasil'chuk Yu. K., Vasil'chuk A. S. Thick polygonal peatlands in continuous permafrost zone of West Siberia. *Kriosfera Zemli [Earth's Cryosphere]*, 2016, no. 4 (XX), pp. 3—13. DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2016-4(3-15).
24. Кобелева Н. В., Прејс Ю. И. Современное состояние и история формирования полигональных болот южных тундр в голоцене (Тазовский полуостров, Западная Сибирь) // Динамика экосистем в голоцене. — 2022. — С. 240—245.
- Kobeleva N. V. Prejs Yu. I. The current state and history of the formation of polygonal peatlands of the Southern tundra in the Holocene (Taz Peninsula, Western Siberia). *Dinamika ekosistem v golotsene*, 2022, pp. 240—245. (In Russian).
25. Alley R. B., Ágústsdóttir A. M. The 8k event: Cause and consequences of a major Holocene abrupt climate change. *Quaternary Science Reviews*, 2005, 24 (10-11), pp. 1123—1149. DOI: 10.1016/j.quascirev.2004.12.004.
26. Хантемиров Р. М., Шиятов С. Г., Горланова Л. А. и др. 8768-летняя Ямальская древесно-кольцевая хронология как инструмент для палеоэкологических реконструкций // Экология. — 2021. — № 5. — С. 388—397.
- Khantemirov R. M., Shiyatov S. G., Gorlanova L. A. et al. 8768-year-old Yamal tree-ring chronology as a tool for paleoecological reconstructions. *Ekologiya*, 2021, № 5, pp. 388—397. (In Russian).
27. Панова Н. К., Трофимова С. С., Антипина Т. Г. и др. Динамика растительности и экологических условий в голоцене на южном Ямале (по данным комплексного анализа отложений реликтового торфяника) // Экология. — 2010. — № 1. — С. 22—30.
- Panova N. K., Trofimova S. S., Antipina T. G., Zinov'ev E. V., Gilev A. V., Erokhin N. G. Dynamics of vegetation and ecological conditions in the Holocene in Southern Yamal (according to a comprehensive analysis of relict peat bog deposits). *Ekologiya*, 2010, № 1, pp. 22—30. (In Russian).
28. Клименко В. В., Мацковский В. В., Дальманн Д. Комплексная реконструкция температуры российской Арктики за последние два тысячелетия // Арктика: экология и экономика. — 2013. — № 4 (12). — С. 84—95.
- Klimenko V. V., Matskovskii V. V., Dalmann D. Kompleksnaya rekonstruktsiya temperatury rossiiskoi Arktiki za posledniye dva tysyacheletiya. *Arctic: Ecology and Economy*, 2013, no. 4 (12), pp. 84—95. (In Russian).
29. Ernakovich J., Hopping K., Berdanier A., Simpson R., Kachergis E., Steltzer H., Wallenstein M. Predicted responses of arctic and alpine ecosystems to altered seasonality under climate change. *Global Change Biology*, 2014, vol. 20. DOI: 10.1111/gcb.12568.
30. Shur Yu., Hinkel K. M., Nelson F. E. The transient layer: implications for geocryology and climate-change science. *Permafrost and Periglacial Processes*, 2005, vol. 16, pp. 5—18.
31. Королева Е. С., Слагода Е. А., Мельников В. П. и др. Идентификационные признаки переходного и промежуточного слоев в полигональных торфяниках севера Западной Сибири // ДАН. Науки о Земле. — 2021. — Т. 498, № 2. — С. 131—137.
- Koroleva E. S., Slagoda E. A., Mel'nikov V. P. et al. Identification features of transitional and intermediate layers in polygonal peat bogs of the North of Western Siberia. *DAN. Nauki o Zemle*, 2021, vol. 498, no. 2, pp. 131—137.

### Информация об авторах

**Васильчук Алла Константиновна**, доктор географических наук, ведущий научный сотрудник, географический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119191, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1), e-mail: acvasilchuk@geogr.msu.ru.

**Васильчук Юрий Кириллович**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, географический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119191, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1), e-mail: vasilch\_geo@mail.ru.

**Буданцева Надежда Аркадьевна**, кандидат географических наук, старший научный сотрудник, географический факультет, Московский государственный университет им. М. В. Ломоносова (119191, Россия, Москва, Ленинские горы, д. 1), e-mail: nadin.budanceva@mail.ru.

**Гинзбург Александр Павлович**, аспирант, Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН (142290, Россия, Московская область, Пущино, Институтская ул., д. 2, стр. 2), e-mail: alexandrginzburg13154@yandex.ru.

**Литвинский Владимир Анатольевич**, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Палеонтологический институт им. А. А. Борисяка, РАН (117997, Россия, Москва, Профсоюзная ул., д. 123), e-mail: vl.litvinskii@gmail.com.

## CONTENT AND VARIATIONS OF STABLE CARBON AND NITROGEN ISOTOPES IN THE POLYGONAL PEAT BOGS NEAR THE VILLAGE OF NOVY PORT, YAMAL PENINSULA

Vasil'chuk, A. C.<sup>1</sup>, Vasil'chuk, Yu. K.<sup>1</sup>, Budanceva, N. A.<sup>1</sup>, Ginzburg, A. P.<sup>2</sup>, Litvinskii, V. A.<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Lomonosov Moscow State University (Moscow, Russian Federation)

<sup>2</sup> Institute of Physico-Chemical and Biological Problems of Soil Science of Russian Academy of Sciences (Pushchino, Russian Federation)

<sup>3</sup> Borissiak Paleontological Institute (Moscow, Russian Federation)

The article was received on October 23, 2025

### For citing

Vasil'chuk A. C., Vasil'chuk Yu. K., Budantseva N. A., Ginzburg A. P., Litvinskii V. A. Content and variations of stable carbon and nitrogen isotopes in the polygonal peat bogs near the village of Novy Port, Yamal Peninsula. *Arctic: Ecology and Economics*, 2026, vol. 16, no. 2, pp. 204—214. DOI: 10.25283/2223-4594-2026-2-204-214. (In Russian).

### Abstract

The authors studied polygonal peat bogs on the first and second lagoon-marine terraces in shrub tundra near the village of Novy Port in the south-east of the Yamal Peninsula. They determined the radiocarbon age of the peat, the contents of organic carbon and nitrogen, as well as the isotopic composition of these elements in the peat. The chronology of the peat bogs formation was established: their growth occurred between 8,840 and 7,050 cal BP on the second terrace, and between 9,820 and 7,670 cal BP on the first. According to <sup>14</sup>C dates, the rate of peat accumulation ranged from 0.6 to 1.9 millimeters per year. Global cooling that occurred 8.2 ka BP was mainly expressed in a decrease in nitrogen mineralization due to lower temperatures in winter and during the transitional seasons, but it was not recorded in the summer season in the southern part of the Yamal Peninsula. The boundary between the Greenland and Northgrippian periods is located at a depth between 0.4 and 0.50 meters in peat on the second terrace and between 0.7 and 0.8 meters on the first. The absence of a transition layer indicates maximum peat thaw due to global warming.

**Keywords:** *Holocene, polygonal peat bog, dynamics of biogenic elements, paleoclimate, radiocarbon, stable isotopes of carbon and nitrogen, event 8ka, Yamal.*

### Funding

The research was supported by Russian Science Foundation (grant no. 23-17-00082).

### Acknowledgements

The authors express our gratitude to L. P. Kuzyakin, R. V. Lobov and D. M. Bogatova for their assistance in the field research.

---

### Information about the authors

**Vasil'chuk, Alla Constantinovna**, Doctor of Geography, Leading Researcher, faculty of geography, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991), e-mail: acvasilchuk@geogr.msu.ru.

**Vasil'chuk, Yuri Kirillovich**, Doctor of Geology and Mineralogy, Professor, faculty of geography, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991), e-mail: vasilch\_geo@mail.ru.

**Budanceva, Nadin Arkad'evna**, PhD of Geography, Senior Researcher, faculty of geography, Lomonosov Moscow State University (1, Leninskie Gory, Moscow, Russia, 119991), e-mail: nadin.budantseva@mail.ru.

**Ginzburg, Alexander Pavlovich**, postgraduate student, Institute of Physico-Chemical and Biological Problems of Soil Science of the Russian Academy of Sciences (2, building 2, Institutskaya St., Moscow region, Pushchino, Russia, 142290), e-mail: alexandrginzburg13154@yandex.ru.

**Litvinskii, Vladimir Anatol'evich**, PhD of Biology, Senior Researcher, Borisyak Paleontological Institute of the Russian Academy of Sciences (123, Trade Union St., Moscow, Russia, 117647), e-mail: vl.litvinskiy@gmail.com.

© Vasil'chuk A. C., Vasil'chuk Yu. K., Budantseva N. A., Ginzburg A. P., Litvinsky V. A., 2026