

## РЕКОНСТРУКЦИЯ ПОЗДНЕНЕОПЛЕЙСТОЦЕНОВЫХ И РАННЕГОЛОЦЕНОВЫХ ЗИМНИХ ТЕМПЕРАТУР ВОЗДУХА НА ОСТРОВЕ КОТЕЛЬНЫЙ ПО ИЗОТОПНОМУ СОСТАВУ ПОВТОРНО-ЖИЛЬНЫХ ЛЬДОВ

Ю.К. Васильчук<sup>1,2</sup>, В.М. Макеев<sup>3</sup>, А.А. Маслаков<sup>1</sup>, Н.А. Буданцева<sup>1</sup>, А.К. Васильчук<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический и геологический ф-ты, 119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия

<sup>2</sup>Тюменский государственный университет, 625003, Тюмень, ул. Володарского, 6, Россия; [vasilch\\_geo@mail.ru](mailto:vasilch_geo@mail.ru)

<sup>3</sup>Российский государственный гидрометеорологический университет, 109017, Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98, Россия

Палеогеокриологические реконструкции зимних температур выполнены на основе исследования стабильных изотопов кислорода в поздненеоплейстоценовых и голоценовых повторно-жильных льдах на острове Котельный. Обобщены результаты реконструкций палеоэкологических условий по палинологическим данным в ключевые периоды позднего неоплейстоцена и голоцена. Установлено, что вариации значений  $\delta^{18}\text{O}$  в повторно-жильных льдах, сформировавшихся в позднем неоплейстоцене, превышают 6 ‰ (от –30.6 до –24.0 ‰). Изотопный состав голоценовых повторно-жильных льдов был более стабилен, амплитуда колебаний значений  $\delta^{18}\text{O}$  не превышала 1.5 ‰ (от –23.1 до –21.6 ‰). Среднеянварская температура в позднем неоплейстоцене на Котельном была на 10–12 °С ниже современной. При этом среднезимние температуры в холодные периоды каргинского времени были ниже, чем в сартанское время. В течение позднего неоплейстоцена на о. Котельный отмечены периоды с достаточно высокими температурами вегетационного периода, обеспечивавшими существование отдельных массивов древесной растительности. Среднеянварская температура в раннем голоцене на острове могла быть на 1.0–1.5 °С ниже современной. В начале голоцена условия вегетационного периода были благоприятны для быстрого роста торфяников и распространения крупнокустарниковой растительности.

*Голоцен, поздний неоплейстоцен, едома, зимняя палеотемпература, ледяные жилы, стабильные изотопы кислорода и водорода, радиоуглеродный возраст, Арктические острова*

## LATE PLEISTOCENE AND EARLY HOLOCENE WINTER AIR TEMPERATURE RECONSTRUCTIONS OF THE KOTELNY ISLAND USING STABLE ISOTOPES OF ICE WEDGES

Yu.K. Vasil'chuk<sup>1,2</sup>, V.M. Makeev<sup>3</sup>, A.A. Maslakov<sup>1</sup>, N.A. Budantseva<sup>1</sup>, A.C. Vasil'chuk<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography and Faculty of Geology, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia

<sup>2</sup>Tyumen State University, 6, Volodarskogo str., Tyumen, 625003, Russia; [vasilch\\_geo@mail.ru](mailto:vasilch_geo@mail.ru)

<sup>3</sup>Russian State Hydrometeorological University, 98, Malookhtinsky prosp., St. Petersburg, 109017, Russia

Late Pleistocene and Holocene winter air temperatures in Kotelny Island, northeastern Russian Arctic, have been reconstructed using oxygen isotope compositions of ice wedges and correlated with evidence of Late Pleistocene and Holocene climate variations inferred from pollen data. The  $\delta^{18}\text{O}$  range exceeds 6 ‰ in Late Pleistocene ice wedges but is only 1.5 ‰ in the Holocene ones (–30.6 ‰ to –24.0 ‰ against –23.1 ‰ to –21.6 ‰, respectively). The Late Pleistocene mean January air temperatures in Kotelny Island were 10–12 °C lower than the respective present temperature. On the other hand, mean winter temperatures in cold substages during the Karga interstadial were colder than those during the Sartan glacial event. The Late Pleistocene–Holocene climate history included several warm intervals when air temperatures were high enough to maintain the existence of low canopy tree patches in Kotelny Island. Mean January air temperatures in the early Holocene were only 1.0–1.5 °C lower than now. The early Holocene vegetation conditions were favorable for prolific growth of shrubs and fast peat accumulation.

*Holocene, Late Pleistocene, yedoma, winter paleotemperature, ice wedge, oxygen and hydrogen stable isotopes, radiocarbon age, Arctic islands*

## ВВЕДЕНИЕ

Цель работы – исследовать изотопный состав кислорода и водорода поздненеоплейстоценовых и голоценовых повторно-жильных льдов (ПЖЛ) острова Котельный и реконструировать зимние палеотемпературные и палеоэкологические условия в ключевые периоды позднего неоплейстоцена

и голоцена, а также рассмотреть изменения условий вегетационного периода.

Считается, что остров был открыт в 1773 г. купцом Иваном Ляховым во время наблюдения за кочующими стадами диких оленей. Он назван Котельным из-за забытого здесь первооткрывателя-

ми медного котла [Россия..., 2018]. Одним из первых геологов остров посетил Э.В. Толль [1897]. А.В. Ложкиным [1977] были получены первые  $^{14}\text{C}$ -датировки едомы о. Котельный. В обнажениях на р. Балыктах В.М. Макеевым с соавт. [1989] изучены мощные ПЖЛ и найдено большое количество костей мамонтов, также выполнено детальное радиоуглеродное датирование едомных толщ острова. В 1999 г. группа немецких и российских ученых посетила Котельный и исследовала два едомных разреза на севере острова в районе мыса Анисий и на юго-западе в устье р. Хомурганнах [Schirmer et al., 2003, 2011]. На южном берегу о. Котельный на высоте 2.5–3.5 м над уровнем моря были изучены льдистые гравелистые пески, содержащие ПЖЛ [Деревягин и др., 2007]. В 2012 г. в рамках экспедиции Русского географического общества Н.Г. Белова и сотрудники географического

факультета МГУ изучили два небольших обнажения едомы на юге острова [Belova et al., 2015].

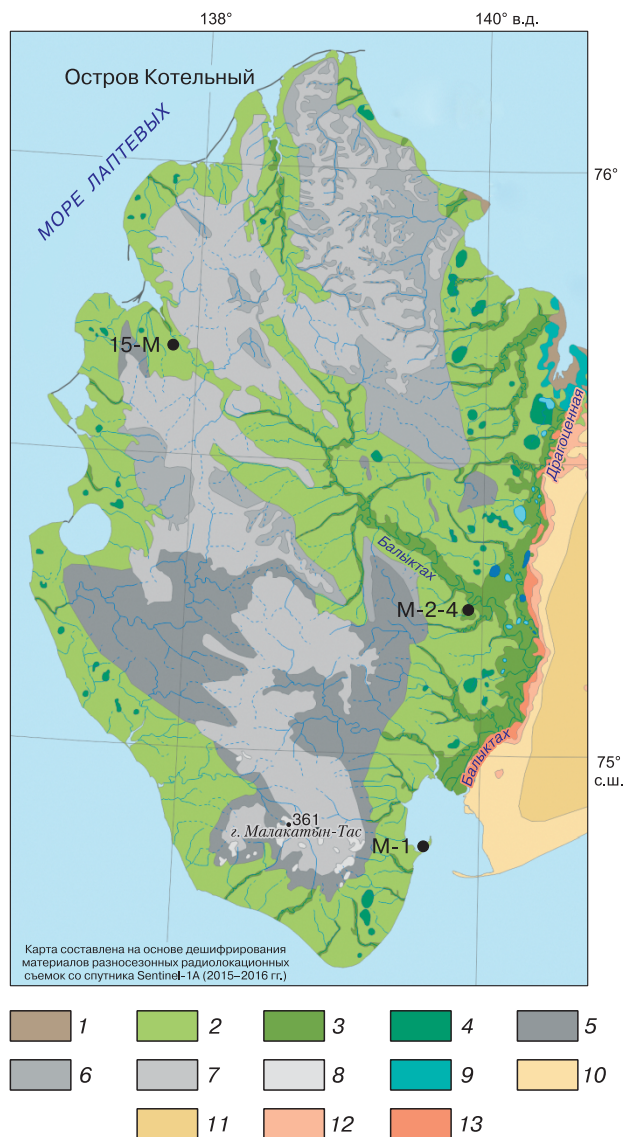
### Район исследований

Остров Котельный (74–76° с.ш., 136–145° в.д.) является частью подгруппы островов Анжу в архипелаге Новосибирских островов, расположенных между морями Лаптевых и Восточно-Сибирским. В пределах острова широко распространены позднечетвертичные низменные (до 50 м) равнины, сложенные едомным комплексом и покрытые тундровой растительностью (рис. 1), а также плоские и пологонаклонные низменные равнины высотой от 50 до 300 м, нередко сильно расчлененные с растительным покровом горных арктических пустынь.

### Климат и растительность

Климат на острове арктический. Среднегодовая температура воздуха  $-14.3^\circ\text{C}$ , средняя температура июля всего  $+2.9^\circ\text{C}$ . Самый холодный месяц – февраль со средней температурой  $-29.7^\circ\text{C}$ . Минимальная температура ( $-49.5^\circ\text{C}$ ) отмечена в феврале 2002 г., а максимальная ( $+25.1^\circ\text{C}$ ) – в июле 1991 г. Температура ниже  $-30^\circ\text{C}$  может наблюдаться с октября по апрель. Переход среднесуточных температур через  $0^\circ\text{C}$  на о. Котельный происходит 13 июня и 18 сентября [Климат..., 2018; Dobrowolska, 2014].

Согласно геоботаническому районированию, растительность на острове относится к зоне кустарничково-моховых арктических пустынь [Городков, 1956]. Тундровая растительность на возвышенностях с полигональным рельефом представлена в основном *Salix polaris* Wahlenb., *Alopecurus*



**Рис. 1. Расположение опорных разрезов с повторно-жильными льдами на ландшафтной карте о. Котельный (по: [Трошко, 2018], с упрощением).**

1 – приливные осушки; 2 – низменные равнины (до 50 м), сложенные едомным комплексом с умеренной степенью эрозионно-термокарстового расчленения и тундровой растительностью; 3 – долины рек с болотной растительностью; 4 – днища и склоны термокарстовых котловин “аласов”; 5 – плоские и пологонаклонные низменные равнины (50–100 м); платообразные возвышенные равнины (100–300 м) с растительностью горных арктических пустынь; 6 – сильно расчлененные пологоволнистые, 7 – слаборасчлененные плоские и пологонаклонные; 8 – округло-вершинные выпуклые гребни (горы) высотой более 300 м, практически лишенные растительности; 9 – прибрежная равнина высотой до 8 м с термокарстовым расчленением и болотной растительностью; 10 – I морская терраса высотой до 10 м с растительностью арктических пустынь эолового микро рельефа высотой до 3 м; 11 – I морская терраса высотой до 10 м с растительностью арктических пустынь эолового микро рельефа высотой 3–10 м; 12 – II морская терраса высотой 10–25 м с преимущественно эрозионным расчленением и растительностью арктических пустынь; 13 – II морская терраса высотой 10–25 м с эрозионным расчленением и тундровой растительностью. Точки М-1, М-2-4, 15-М – расположение разрезов.

*alpinus* Sm., *Saxifraga oppositifolia* L., *Saxifraga nivalis* L., *Papaver radicans* Rottb., *Dryas octopetala* L., *Cassiope tetragona* (L.) D. Don, *Luzula confusa* Lindeb., *Ranunculus hyperboreus* Rottb., *Endocellion glaciale* (Ledeb.) J. Toman и мхами *Ditrichum flexicaule* (Schwägr.) Hampe, *D. capillaceum* (Hedw.) Bruch и др. [Городков, 1956].

В составе субфоссильных палиноспектров на о. Котельный содержание пыли кустарников в среднем составляет 22–44 % (пыльца ивы, ольховника и карликовой березки). Состав пыли трав отражает особенности локальных фитоценозов, в основном это пыльца семейств Poaceae, Polygonaceae, Caryophyllaceae, Asteraceae. Для палиноспектров северной части острова характерно доминирование какого-либо одного компонента, часто спор Bryales или *Selaginella sibirica*, их содержание может достигать 70–90 %. Такого типа палиноспектры встречаются в разрезах едомных толщ и интерпретируются как палиноспектры полярных пустынь. В субфоссильных палиноспектрах отмечено высокое содержание пыли и спор (20–90 %), переотложенных из неогеновых осадков [Ложкин, 1977, 2002].

#### Геокриологические условия

Первые сведения о мерзлотных условиях Новосибирских островов имеются в работе Б.Н. Городкова [1948]. Период сезонного протаивания длится не более 2.5 месяцев. Средняя глубина протаивания варьирует в широком диапазоне от 10–28 см в западинах между кочками до 48 см на вершинах байджемах. Скорость протаивания почв в таких условиях низкая – обычно не более 0.3–0.5 см/сут [Качинский, 2014].

Отложения ледового комплекса распространены на абсолютных отметках 15–30 м [Schirmer et al., 2011]. На поверхности едомы развиты термокарстовые депрессии и термоэрозионные овраги, на склонах встречаются байджемахи. В комплексе верхнеплейстоценовых и голоценовых отложений В.М. Макеев с соавт. [1989] выделили: 1) драгоценнинскую толщу ( $Q_{III}^{dr}$ ), в основном отвечающую казанцевскому и зырянскому горизонтам; 2) балыктахскую толщу ( $Q_{III}^{bl}$ ), близкую по объему к каргинскому и в значительной части к сартанскому горизонтам; 3) среднинскую толщу ( $Q_{III-IV}^{sr}$ ), объединяющую верхнюю часть верхнеплейстоценовых отложений и нижнюю часть голоцена; 4) тугутахскую толщу ( $Q_{IV}^{tg}$ ), охватывающую средний и поздний голоцен. Общая мощность этих отложений не превышает 50–60 м [Макеев и др., 1989].

#### РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

##### Строение полигонально-жильных комплексов и отбор образцов

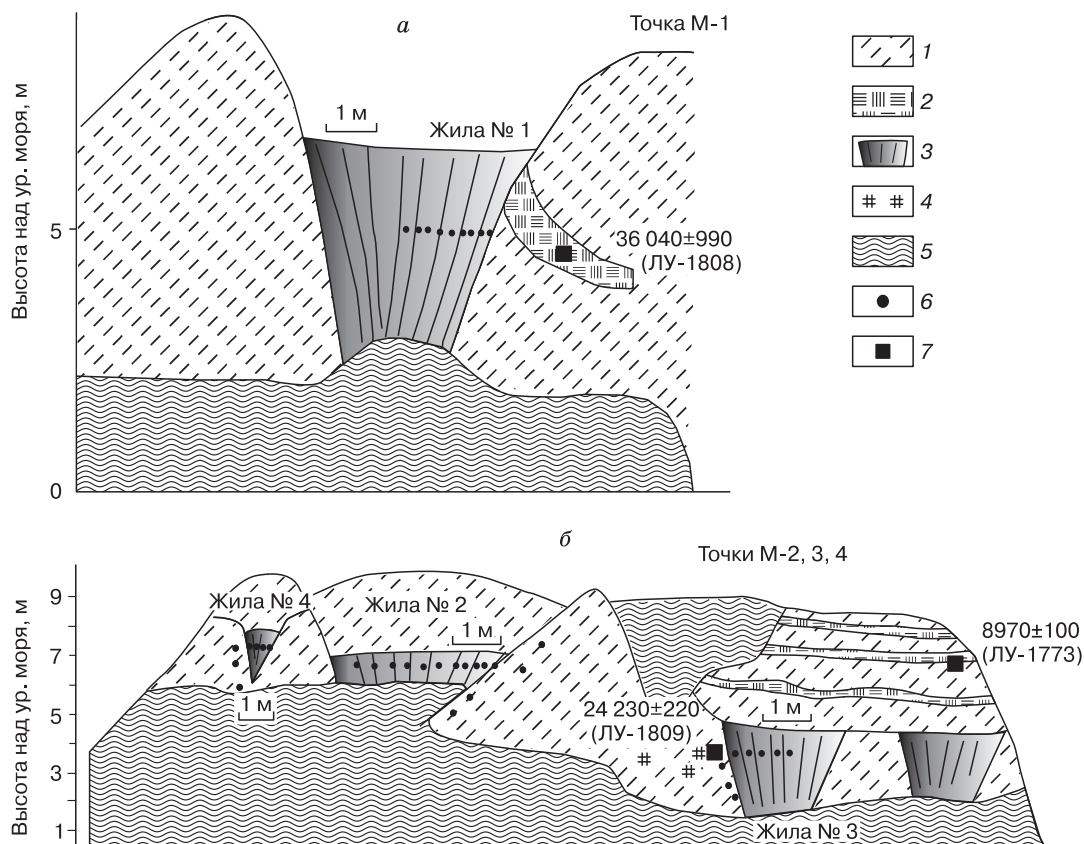
В.М. Макеевым с коллегами [1989] изучены синкриогенные едомные толщи на южном побере-



Рис. 2. Едомные толщи и позднеплейстоценовые повторно-жильные льды на о. Котельный.

а – фото В. Макеева, б–г – фото Н. Беловой.

жье острова, в долине р. Балыктах и в северо-западной части острова (рис. 2, а).



**Рис. 3. Радиоуглеродные датировки и точки отбора образцов на изотопный анализ в разрезах позднеоплейстоценовых отложений с повторно-жильными льдами на о. Котельный.**

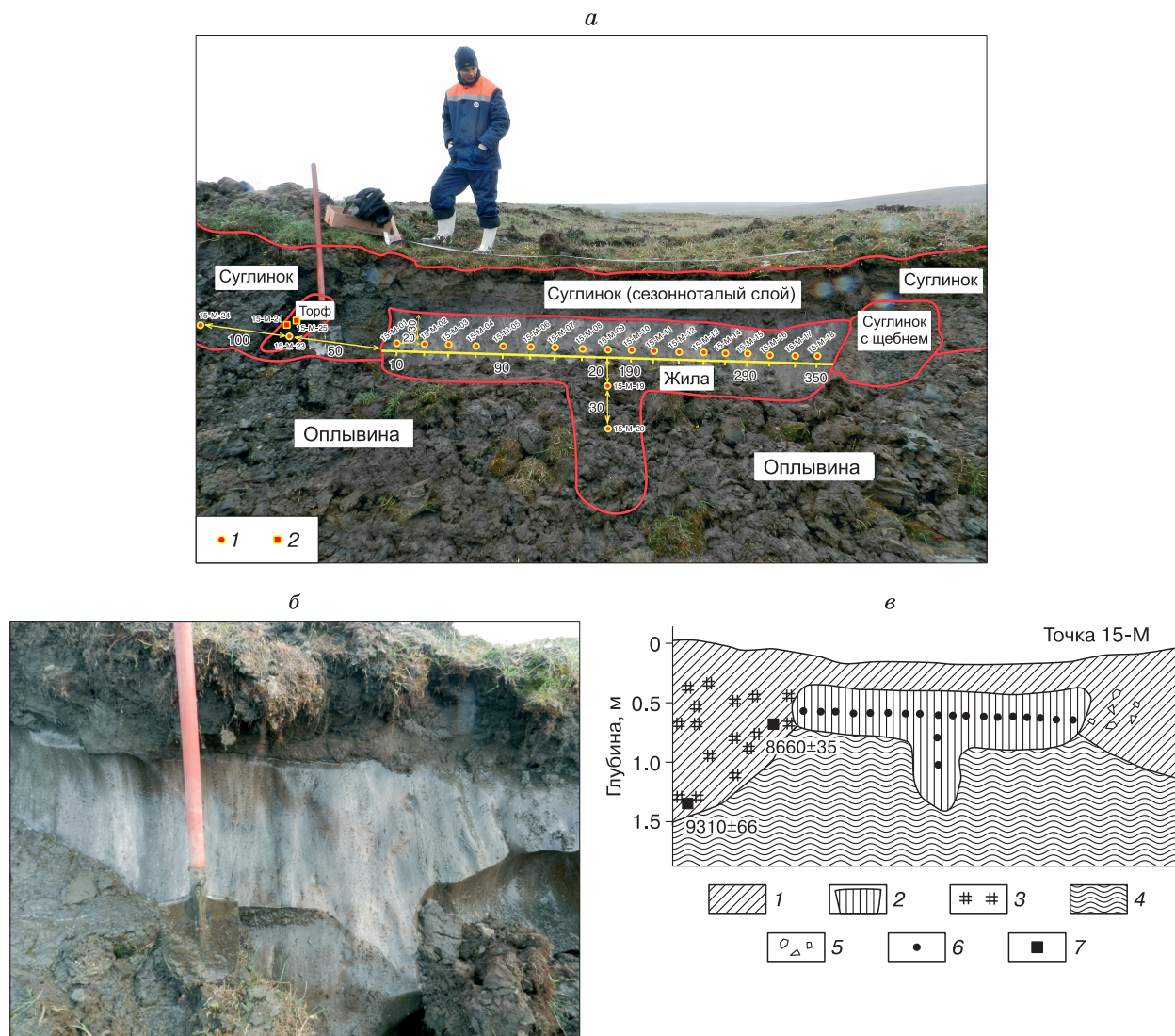
*a* – жилы на южном побережье о. Котельный; *б* – в долине р. Балыктах. 1 – супесь; 2 – торф; 3 – ПЖЛ; 4 – гнезда торфа; 5 – оплывины и осыпи; 6 – точки отбора повторно-жильного льда на изотопный анализ; 7 – точки отбора на  $^{14}\text{C}$ -анализ и датировки.

Точка М-1 (рис. 3, *a*) расположена на южном побережье острова вблизи устья р. Карга (см. рис. 1). В видимой части берегового уступа вскрываются слоистые мерзлые супеси голубовато-серого цвета с включением окатышей торфа бурого цвета, реже мелкого галечника, и с прослоями тонко- и толстошлирового льда. На высоте около 5 м от уреза воды встречена линза торфа. В толще супесей залегает ледяная жила, кровля которой имеет ширину 3.5 м, высоту около 5 м. Слои супесей и суглинков на контакте с жильным льдом загнуты вверх. Для жильного льда характерна вертикальная слоистость, представленная чередованием матового и прозрачного льда. Из льда отобрано 10 образцов на изотопный анализ с интервалом около 30 см (см. рис. 3, *a*). Для радиоуглеродного датирования отобран торф из торфяной линзы.

Точки М-2–4 (см. рис. 3, *б*) расположены в среднем течении р. Балыктах на правом берегу долины (см. рис. 1). В береговом склоне на протяжении более 50 м фрагментарно вскрываются горизонтально-слоистые супеси с линзами детритово-

го торфа, в которых залегают ПЖЛ. Большая часть вскрытых жил имеет ширину 3.0–3.5 м и высоту до 4 м. Жила № 4, приуроченная к вершине байджежах, имеет ширину около 1 м и высоту 1.5 м. Во всех жилах отчетливо выражена вертикальная слоистость. В указанную толщу врезаны более молодые аллювиальные отложения, представленные супесями темно-серого цвета, горизонтально-слоистыми с прослоями детритового торфа мощностью около 2.5 м. Из вертикальных слоев ледяных жил № 2–4, а также из шлиров льда, вмещающих жилы № 2 и 3, отобраны пробы льда для определения стабильных изотопов (возможно, в жилу № 2 вклинивается голоценовый лед). Из прослоев торфа отобраны образцы на радиоуглеродный анализ.

Точка 15-М расположена в северо-западной части о. Котельный, где летом 2015 г. А.А. Маслаковым был опробован ПЖЛ голоценового возраста (рис. 4, *a, б*). Точка описания расположена на слабонаклонной поверхности (абс. отметки 24–38 м). Многолетнемерзлые вмещающие отложе-



**Рис. 4. Обнажение голоценовых повторно-жильных льдов на северо-западном побережье о. Котельный (а, б) и схема отбора образцов с радиоуглеродными датировками (в).**

1 – суглинок; 2 – ледяная жила; 3 – линзы и гнезда торфа; 4 – опывины и осыпи; 5 – щебень; 6 – точки отбора повторно-жильного льда на изотопный анализ; 7 –  $^{14}\text{C}$ -датировки. Фото А.А. Маслакова.

ния представлены суглинком серым, реже светлорыжевато-коричневым, иногда с большим содержанием дресвы и щебня. Криотекстура – массивная, реже косая линзовидная. В суглинках встречаются линзы и гнезда льдистого торфа черного и темно-бурого цвета с включениями корней. В самой верхней части суглинка вскрыт слой торфа мощностью 5–10 см. Кровля жилы залегает на глубине 0.4 м от поверхности. Жила имеет четкие ровные боковые и верхние контакты. Контакт кровли и перекрывающих отложений маркирует слой (1 см) прозрачного льда с крупными (до 5 мм) вертикально вытянутыми пузырьками воздуха. Лед жилы вертикально-слоистый за счет чередования светлого

матового, темного матового и прозрачного льда. В большом количестве отмечены включения пузырьков воздуха размерами 0.5–3.0 мм. Отбор образцов жильного льда на изотопный анализ произведен по горизонтали на глубине 0.6 м с интервалом 0.2 м (см. рис. 4, в).

#### Методы лабораторных определений

Радиоуглеродное датирование голоценовой органики из вмещающих отложений выполнено в Институте материальной культуры, Санкт-Петербург (лабораторный номер Ле). Определения содержания стабильных изотопов кислорода и водорода в жиле в точке 15-М, опробованной в 2015 г., выполнены в изотопной лаборатории гео-

графического факультета МГУ на масс-спектрометре Delta-V со стандартной опцией газ-бенч. Для калибровки измерений использовались международные стандарты V-SMOW, SLAP, а также лабораторные стандарты. Погрешность определений составила  $\pm 0.6\text{ ‰}$  для  $\delta^2\text{H}$  и  $\pm 0.1\text{ ‰}$  для  $\delta^{18}\text{O}$ . Определения содержания стабильных изотопов кислорода в едомной толще выполнены в изотопной лаборатории Института геологии АН Эстонии на масс-спектрометре Finnigan Delta-E.

### Радиоуглеродный возраст вмещающих отложений

Синкриогенная голоценовая толща в северо-западной части о. Котельный (см. рис. 4, в) датирована авторами по  $^{14}\text{C}$  началом голоцена: образец торфа (в 0.5 м слева от левого края ледяной жилы) с глубины 0.7 м датирован  $8660 \pm 35$  лет (Ле-11256), образец торфа (в 4 м слева от левого края ледяной жилы) с глубины 1.4 м датирован  $9310 \pm 66$  лет (Ле-11258).

Наиболее подробно датирована синкриогенная позднеплейстоценовая едомная толща в долине р. Балыктах [Макеев и др. 1989; Макеев *et al.*, 2003]. По автохтонному торфу получена серия датировок от 24.2 до 10 тыс. лет: датировка  $24\,230 \pm 220$  лет (ЛУ-1809) получена по торфу под жилой, датировка 10 000 лет (ЛУ-1773) получена над жилой (см. рис. 3, б). На южном побережье в непосредственной близости от ПЖЛ изогнутый к жиле прослой торфа датирован  $36\,040 \pm 990$  лет (ЛУ-1808) (см. рис. 3, а).

### Изотопный состав ПЖЛ

Из полученных данных содержания стабильных изотопов кислорода и водорода следует, что позднеплейстоценовые жилы о. Котельный характеризуются более низкими значениями по сравнению с голоценовыми.

В позднеплейстоценовой ледяной жиле № 3 (см. рис. 3) величины  $\delta^{18}\text{O}$  варьируют от  $-30.0$  до  $-27.4\text{ ‰}$  (среднее значение  $-28.5\text{ ‰}$ ), в припаянных к ней шлирах – от  $-27.4$  до  $-24.6\text{ ‰}$  (среднее  $-25.5\text{ ‰}$ ). В двух жилах, располагающихся стратиграфически несколько выше (ближе к кровле), значения  $\delta^{18}\text{O}$  изменялись следующим образом: в жиле № 2 – от  $-26.2$  до  $-22.9\text{ ‰}$  (возможно, в жилу № 2 вклинивается голоценовый лед –  $\delta^{18}\text{O}$  от  $-22.9$  до  $-23.9\text{ ‰}$ ), в жиле № 4 – от  $-27.1$  до  $-24.9\text{ ‰}$  (среднее  $-25.9\text{ ‰}$ ).

В голоценовой жиле в северо-западной части о. Котельный значения  $\delta^{18}\text{O}$  изменяются от  $-23.14$  до  $-21.64\text{ ‰}$  (среднее  $-22.5\text{ ‰}$ ), значения  $\delta^2\text{H}$  – от  $-174.1$  до  $-163.1\text{ ‰}$  (среднее  $-169.3\text{ ‰}$ ), дейтериевый эксцесс ( $d_{\text{exc}}$ ) – от 6.9 до 12.8 ‰ (среднее 10.4 ‰) (табл. 1, 2).

Изотопные значения льда голоценовой жилы на диаграмме  $\delta^{18}\text{O}$ – $\delta^2\text{H}$  (рис. 5) располагаются вблизи глобальной линии метеорных вод (SMOW), что указывает на атмосферную природу воды и равновесное изотопное фракционирование при образовании атмосферной влаги и жильного льда.

Линейная аппроксимация значений  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  выражается наклоном 6,7 и свободным чле-

Таблица 1. Вариации значений  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$  и  $d_{\text{exc}}$  в голоценовых повторно-жильных льдах в северо-западной части о. Котельный (точка 15-М)

| Полевой номер образца | Глубина, м | Расстояние от левого края жилы, м | $\delta^{18}\text{O}$ , ‰ | $\delta^2\text{H}$ , ‰ | $d_{\text{exc}}$ , ‰ |
|-----------------------|------------|-----------------------------------|---------------------------|------------------------|----------------------|
| 15-М-02               | 0.57       | 0.3                               | -22.64                    | -174.1                 | 7.02                 |
| 15-М-03               | 0.57       | 0.5                               | -21.64                    | -166.2                 | 6.92                 |
| 15-М-04               | 0.57       | 0.7                               | -22.12                    | -164.8                 | 12.16                |
| 15-М-05               | 0.57       | 0.9                               | -22.80                    | -171.4                 | 11.0                 |
| 15-М-06               | 0.57       | 1.1                               | -22.76                    | -169.3                 | 12.78                |
| 15-М-07               | 0.57       | 1.3                               | -22.98                    | -172.4                 | 11.44                |
| 15-М-08               | 0.57       | 1.5                               | -22.25                    | -166.2                 | 11.8                 |
| 15-М-09               | 0.57       | 1.7                               | -21.95                    | -165.2                 | 10.4                 |
| 15-М-10               | 0.57       | 1.9                               | -22.85                    | -173.8                 | 9.0                  |
| 15-М-11               | 0.57       | 2.1                               | -22.69                    | -169.6                 | 11.92                |
| 15-М-12               | 0.57       | 2.3                               | -23.14                    | -173.4                 | 11.72                |
| 15-М-13               | 0.57       | 2.5                               | -21.81                    | -163.1                 | 11.38                |
| 15-М-14               | 0.57       | 2.7                               | -22.64                    | -168.3                 | 12.82                |
| 15-М-15               | 0.57       | 2.9                               | -22.64                    | -170.0                 | 11.12                |
| 15-М-16               | 0.57       | 3.1                               | -22.71                    | -172.4                 | 9.28                 |
| 15-М-17               | 0.57       | 3.3                               | -22.18                    | -167.8                 | 9.64                 |
| 15-М-18               | 0.57       | 3.5                               | -22.35                    | -170.6                 | 8.2                  |
| 15-М-19               | 0.77       | 1.7                               | -22.30                    | -169.2                 | 9.2                  |

Таблица 2. Вариации  $\delta^{18}\text{O}$  (‰ к SMOW) в позднеплейстоценовых повторно-жильных (ПЖЛ) и текстурных (текст.) шлировых льдах, расположенных в долине р. Балыктах и на п-ове Сопочная Карга

| Номер образца                                             | Вид льда | Высота*, м | $\delta^{18}\text{O}$ , ‰ | Номер образца | Вид льда | Высота*, м | $\delta^{18}\text{O}$ , ‰ |
|-----------------------------------------------------------|----------|------------|---------------------------|---------------|----------|------------|---------------------------|
| <i>Долина р. Балыктах</i>                                 |          |            |                           |               |          |            |                           |
| M-2/1                                                     | ПЖЛ      | 6.5 (0.3)  | -22.9                     | M-4/1         | Текст.   | 6.0        | -25.6                     |
| M-2/2                                                     | ПЖЛ      | 6.5 (0.7)  | -23.3                     | M-4/2         | Текст.   | 6.5        | -24.2                     |
| M-2/3                                                     | ПЖЛ      | 6.5 (1.1)  | -23.9                     | M-4/3         | Текст.   | 6.8        | -26.4                     |
| M-2/4                                                     | ПЖЛ      | 6.5 (1.5)  | -26.3                     | M-3/1         | ПЖЛ      | 3.8 (0.2)  | -29.7                     |
| M-2/5                                                     | ПЖЛ      | 6.5 (1.8)  | -24.8                     | M-3/2         | ПЖЛ      | 3.8 (0.6)  | -30.0                     |
| M-2/6                                                     | ПЖЛ      | 6.5 (2.1)  | -24.8                     | M-3/4         | ПЖЛ      | 3.8 (1.0)  | -28.2                     |
| M-2/7                                                     | ПЖЛ      | 6.5 (2.5)  | -25.1                     | M-3/5         | ПЖЛ      | 3.8 (1.5)  | -27.4                     |
| M-2/8                                                     | ПЖЛ      | 6.5 (2.8)  | -24.5                     | M-3/6         | ПЖЛ      | 3.8 (1.9)  | -27.4                     |
| M-2/9                                                     | ПЖЛ      | 6.5 (3.1)  | -24.9                     | M-3/7(1)      | Текст.   | 2.0        | -27.4                     |
| M-2/10                                                    | ПЖЛ      | 6.5 (4.0)  | -26.2                     | M-3/8(2)      | Текст.   | 2.5        | -24.6                     |
| M-2/11                                                    | ПЖЛ      | 6.5 (4.5)  | -24.0                     | M-3/9(3)      | Текст.   | 3.3        | -24.6                     |
| M-2/12                                                    | Текст.   | 5.0        | -26.7                     | M-4/1         | ПЖЛ      | 6.8 (0.2)  | -26.1                     |
| M-2/13                                                    | Текст.   | 5.5        | -27.7                     | M-4/2         | ПЖЛ      | 6.8 (0.5)  | -25.7                     |
| M-2/14                                                    | Текст.   | 6.4        | -28.6                     | M-4/3         | ПЖЛ      | 6.8 (0.8)  | -24.9                     |
| M-2/15                                                    | Текст.   | 7.3        | -29.9                     | M-4/4         | ПЖЛ      | 6.8 (1.2)  | -27.1                     |
| <i>Полуостров Сопочная Карга, берег пролива Санникова</i> |          |            |                           |               |          |            |                           |
| M-1/1                                                     | ПЖЛ      | +5 (0.1)   | -30.1                     | M-1/5         | ПЖЛ      | +5 (1.3)   | -30.6                     |
| M-1/2                                                     | ПЖЛ      | +5 (0.4)   | -30.5                     | M-1/8         | ПЖЛ      | +5 (1.9)   | -30.5                     |
| M-1/3                                                     | ПЖЛ      | +5 (0.7)   | -30.3                     | M-1/8         | ПЖЛ      | +5 (2.0)   | -30.2                     |
| M-1/4                                                     | ПЖЛ      | +5 (1.0)   | -29.9                     | M-1/9         | ПЖЛ      | +5 (2.3)   | -30.4                     |

\* Для долины р. Балыктах – высота от уреза (расстояние от правого края жилы); для берега пролива Санникова – абсолютная высота от уровня моря.

ном  $-18.7$  (уравнение  $y = 6.7x - 18.7$ , коэффициент достоверности линейной аппроксимации  $R^2 = 0.7$ ). Диапазон изменения величин  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  во льду жилы очень невелик (1.5 и 11 ‰ соответственно). Близость значений  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  льда голоценовой жилы к глобальной линии метеорных вод позволяет использовать изотопный состав льда жилы для палеотемпературных построений. Полученные значения  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  по льду голоценовой жилы соответствуют значениям  $\delta^{18}\text{O}$  по верхней части ледяной жилы, описанной Н.Г. Беловой с соавт. [Belova et al., 2015] (см. рис. 2, б–г). Согласно этим данным, значения  $\delta^{18}\text{O}$  варьируют от  $-29\ldots-24$  ‰ в нижней видимой части ледяной жилы (глубина 2.5 м) до  $-25\ldots-20$  ‰ в верхней части. Авторы полагают, что здесь в верхние части неоплейстоценовых ПЖЛ внедряются жилы голоценового возраста (очень редкое криолитологическое явление), о чем свидетельствуют не характерные для позднего неоплейстоцена значения  $\delta^{18}\text{O}$ , а также внедрение более молодой узкой ледяной жилы в тело более древней (см. рис. 2, г). Ранее такое было отмечено только в верхней части жил Быковского полуострова [Vasil'chuk, 1988] и в разрезах Ойгосского Яра и о. Большой Ляховский, где из верхней части ПЖЛ, залегающих в едомных

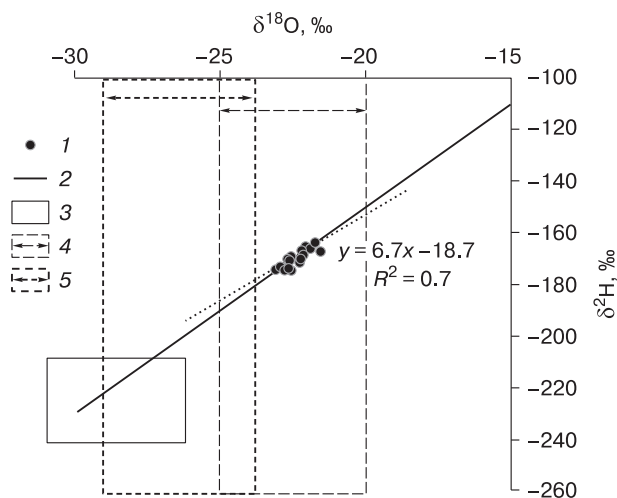


Рис. 5. Отношения  $\delta^2\text{H}$ – $\delta^{18}\text{O}$  (пунктирная линия) в голоценовых повторно-жильных льдах на северо-западе о. Котельный (точка 15-М) и  $\delta^2\text{H}$ – $\delta^{18}\text{O}$  в позднеплейстоценовых ПЖЛ.

1 – значения  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  льда; 2 – глобальная линия метеорных вод (SMOW); 3 – диапазон значений  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  по позднеплейстоценовому жильному льду из работы [Деревягин и др., 2007]; 4 – диапазон значений  $\delta^{18}\text{O}$  для верхней части жилы из [Belova et al., 2015]; 5 – диапазон значений  $\delta^{18}\text{O}$  для нижней части жилы из [Belova et al., 2015].

толщах, были получены голоценовые датировки по метану, содержащемуся в пузырьках воздуха из жил [Moriizumi et al., 1995].

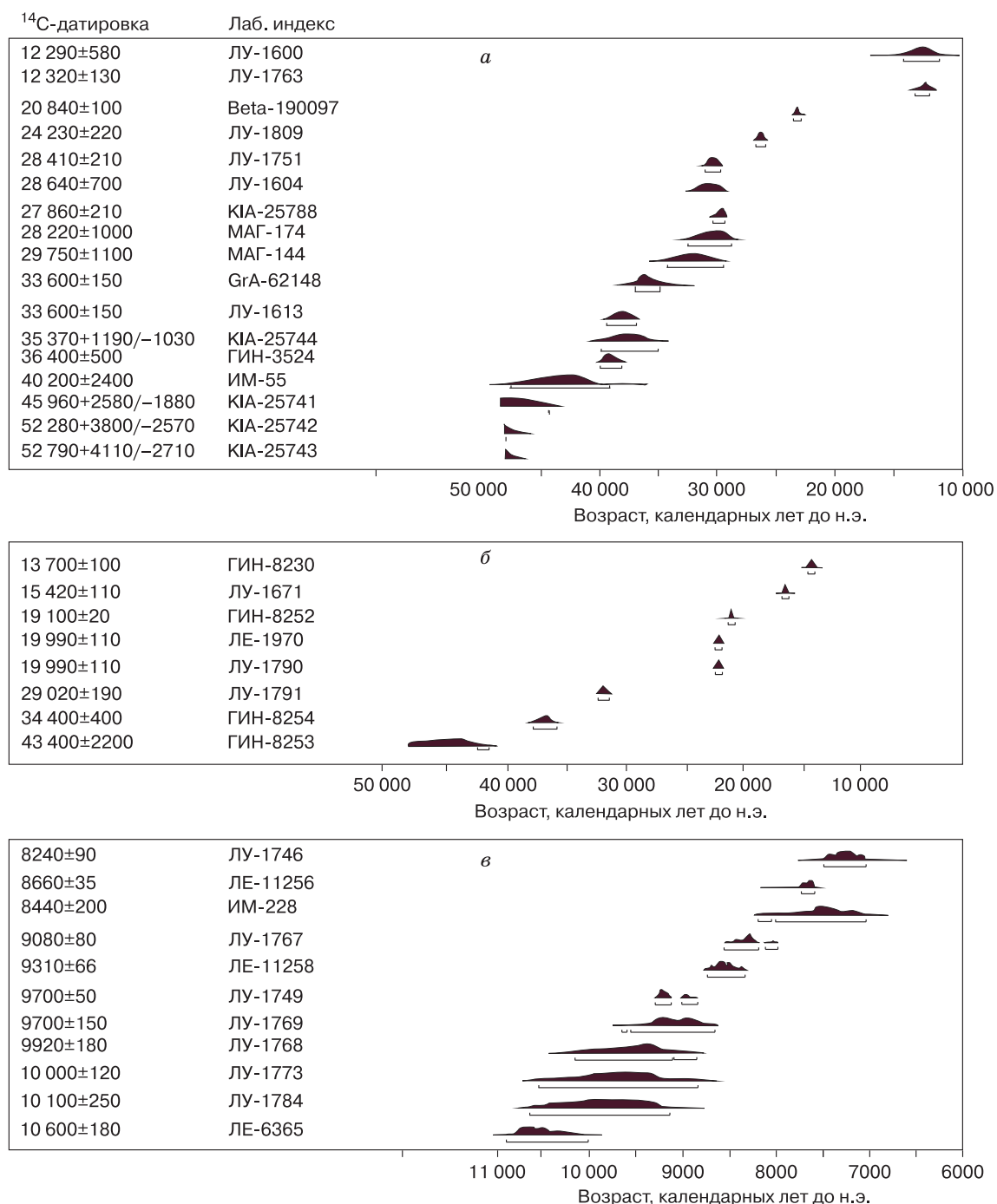
### Изменение палеоэкологических условий в позднем неоплейстоцене и голоцене

Отложения ледового комплекса на о. Котельный датированы от более 55 тыс. лет (в северо-западной части острова и в устье р. Хомурганнах, см. рис. 1) до 27.8–11.0 тыс. лет в северной части острова в районе мыса Анисий [Schirmeister et al., 2011] и до 11.9 тыс. лет в долине р. Балыктах [Павлова и др., 2009]. О возрасте ледяных жил на южном берегу о. Котельный можно судить по двум радиоуглеродным датам органики (растительных остатков и мха в отложениях ледового комплекса): 45 960 ± 2460/– 1880 лет (KIA-25741) и 52 790 ± 4110/– 2710 лет (KIA-25743) [Деревягин и др., 2007; Meyer et al., 2002]. Эти наиболее древние конечные радиоуглеродные датировки по растительному детриту и торфу в едомных отложениях получены при помощи ускорительной масс-спектрометрии в устье р. Хомурганнах. Исследователи [Schirmeister et al., 2011] считают эти даты вполне надежными и фиксируют начало накопления едомных отложений около 55 тыс. лет назад (рис. 6). Согласно датировкам, полученным на острове по разрезам с ПЖЛ [Макеев и др., 1989; Павлова и др., 2009; Васильчук и др., 2016; Makeev et al., 2003; Schirmeister et al., 2003, 2011; Vasil'chuk et al., 2018; настоящая статья], ПЖЛ активно формировались во временные интервалы 50–45, 35–25, 22–12 и 9–2 тыс. лет назад.

На северо-западе о. Котельный А.В. Ложкиным [1977] получены датировки по  $^{14}\text{C}$  для средней части торфяной залежи и для ее кровли 29 750 ± 1100 лет (МАГ-144) и 28 220 ± 1000 лет (МАГ-174). Палинологическая характеристика этих отложений свидетельствует о существовании мозаичных фитоценозов с разнообразным составом растительного покрова. Преобладает пыльца трав (53 %) и в составе этой группы пыльники наиболее многочисленна пыльца Роасеае (50 %), Сурегасеае (17 %) и *Artemisia* (18 %); встречается пыльца Liliaceae (3 %), Polygonaceae (2 %), Caryophyllaceae (13 %), Ranunculaceae (2 %), Fabaceae, Ericales, Compositae и др. Присутствует также пыльца кустарниковых берез, ивы, ольховника (в сумме 14 %), кедрового стланика и ели. Наличие пыльники лилиецветных и ивы говорит о благоприятных условиях для сохранности пыльника, следовательно, переход в многолетнемерзлое состояние произошел достаточно быстро. При карпологиическом анализе торфа В.П. Никитиным были определены орешки *Eriophorum* sp., *Carex* sp. и *C. cf. pauciflora* Lightf. – вид, встречающийся существенно южнее в бассейнах Алдана и верхнего Вилюя, а также три вида мхов, распространенных

от лесной зоны до Арктики. Таким образом, период 34–29 тыс. калиб. лет назад характеризуется типичными тундростепными палиноспектрами с доминированием злаков и полыни [Ложкин, 1977]. На правом берегу р. Балыктах (75°15' с.ш., 139°54' в.д.) изучен ледовый комплекс с сингенетическими ПЖЛ, слагающий II надпойменную террасу и перекрытый торфяно-болотными отложениями. По разрезу получена серия из девяти  $^{14}\text{C}$ -датировок в интервале от 20 840 ± 100 лет (Beta-190097) до 9090 ± 40 лет (ЛЕ-6368) [Павлова и др., 2009]. Из едомного байджераха (75°21'32" с.ш., 139°15'05" в.д.) А.В. Протоповым была отобрана древесина хорошей сохранности, датированная 40 200 ± 2400 лет (ИМ-55) [Галанин и др., 2015], в интервале 47 641–39 528 калиб. лет – наиболее древняя конечная дата для о. Котельный (см. рис. 6). В устье р. Хомурганнах и в долине р. Балыктах получены датировки по растительным и костным остаткам в интервале 40 400–36 100 калиб. лет назад (см. рис. 6). Из результатов палинологического анализа В.М. Макеев с соавт. [1989] пришли к выводу, что в период накопления балыктахской толщи (более 54–28 тыс. лет назад) по долинам рек существовали локальные лесные группировки, а на водоразделах по-прежнему были степные или тундрово-степные ландшафты.

Из разрезов едомы на северо-западном побережье острова, а также в долине р. Балыктах и на мысе Анисий получены радиоуглеродные датировки по растительным остаткам, древесине и костям в интервале 36–22 тыс. калиб. лет назад. В байджерахе А.В. Протоповым были обнаружены остатки лиственницы (75°23'17" с.ш., 139°18'42" в.д.), предположительно залегавшие *in situ* примерно в 530 км к северу от нынешней северной границы лиственницы. В торфе также обнаружены иголки и кора лиственницы, остатки березы. Для отложений, вмещающих датированный ствол лиственницы (36 583–35 469 калиб. лет, см. рис. 6), получена подробная спорово-пыльцевая характеристика. Палинологический анализ свидетельствует о существовании мозаичной лугово-степной растительности с островными лесами [van Geel et al., 2017]. В обоих образцах обнаружена пыльца лиственницы. Она плохо переносится на дальние расстояния и еще хуже сохраняется [Васильчук, Васильчук, 2018], поэтому находки пыльники, даже единичные, свидетельствуют о развитии фитоценозов с участием лиственницы. Можно считать доказанным произрастание лиственницы на территории о. Котельный в интервале 36 583–35 469 калиб. лет. Лиственница появлялась на территории острова и ранее, как следует из датировки древесины, календарный возраст которой 47 641–39 528 калиб. лет [Галанин и др., 2015].



**Рис. 6. Календарный возраст отложений, вмещающих повторно-жильные льды на о. Котельный.**

*а* – поздненеоплейстоценовые датировки растительных остатков и древесины; *б* – поздненеоплейстоценовые датировки костных остатков; *в* – голоценовые датировки растительных остатков.

Калибровка  $^{14}\text{C}$ -датировок проведена с использованием программы Oxcal 4.2 [Bronk Ramsey, 2009], основанной на массиве калибровочных данных IntCal13 [Reimer et al., 2013], по данным радиоуглеродных определений [Ложкин, 1977; Макеев и др., 1989; Сулержицкий, Романенко, 1997; Павлова и др., 2009; Галанин и др., 2015; Schirmermeister et al., 2011; van Geel et al., 2017; настоящая статья].

По растительным остаткам в интервале 22.7–17.0 тыс. калиб. лет назад  $^{14}\text{C}$ -датировки отсутствуют, но имеются даты по коллагену из зубов мамонта и костей лошади 22.4–20.9 тыс. калиб. лет (см. рис. 6) [Сулержицкий, Романенко, 1997]. Можно предположить, что растительный покров на о. Котельный 20–17 тыс. калиб. лет назад не обеспечивал существования крупных млекопитающих и они мигрировали в районы с более благоприятными условиями. Несколько позже растительный покров восстановился. В долине р. Балыктах по растительным и костным остаткам получен ряд датировок от 16.9 до 10.9 тыс. калиб. лет назад. Палинологическая характеристика датированных отложений [Makeev et al., 2003] свидетельствует о преобладании ксерофитных растительных группировок с доминированием полыни в интервале 15.4–12.5 тыс. калиб. лет назад и о существенном сдвиге в составе растительного покрова 12.5–12.2 тыс. калиб. лет назад. Это подтверждается высоким содержанием пыльцы кустарников (45 %) в связи с тем, что в составе фитоценозов появились кустарниковые и кустарничковые виды берез (*Betula* sect. *Fruticosa* и *Betula* sect. *Nanae*), а также ольховник (*Alnaster fruticosus*) и ивы (*Salix* sp.). На заключительном этапе позднего неоплейстоцена 12.2–10.0 тыс. калиб. лет назад содержание пыльцы деревьев и кустарников снизилось до 20 %. В палиносpectрах этого времени преобладает пыльца трав ксерофильных группировок [Makeev et al., 2003].

Радиоуглеродные датировки голоценовых торфяников от 10 до 7 тыс. калиб. лет (см. рис. 6) получены на северо-западном побережье острова, в устье р. Хомурганнах, в долинах рек Драгоценная и Балыктах. В течение голоцена резких изменений в составе палиносpectров не отмечено, они, как правило, близки к современным субфоссильным [Makeev и др., 1989]. Исключение составляет интервал 10–9 тыс. калиб. лет. Палиносpectры из отложений этого возраста характеризуются доминированием пыльцы кустарниковых березы, ольхи, ивы. В результате активизации термокарстовых процессов на острове образовалось большое количество термокарстовых озер, впоследствии ставших аласами, стали накапливаться торфяники (до 0.4–0.5 см/год), в долинах рек появились крупные кустарники. Интервал 8–7 тыс. калиб. лет назад, по данным Д.П. Пономаревой [Makeev et al., 2003], характеризуется высоким содержанием пыльцы деревьев и кустарников (до 40 %), в основном пылью *Betula* sect. *Fruticosa*, *B.* sect. *Nanae*, *Salix*, при этом в торфе обнаружены остатки крупных кустарников. Максимум содержания пыльцы кустарников приходится на 7.5–7.0 тыс. калиб. лет назад. Эти данные подтвердили предположение Б.Н. Городкова о формировании мощных торфяников на о. Котельный в самом начале голо-

цена [Городков, 1956]. Торфяники на острове накапливались и позднее. Подошва мощного торфяника в основании первой речной террасы р. Балыктах датирована  $5460 \pm 100$  лет (ЛЕ-6433), а его кровля –  $3040 \pm 100$  лет (ЛЕ-6429) [Анисимов, 2010]. Из верхней части первой террасы М.А. Анисимовым получена серия датировок, определяющих начало вреза рек, связанного с изменением базиса эрозии: от  $3870 \pm 90$  лет (ЛЕ-6408) до  $3480 \pm 100$  лет назад (ЛЕ-6422). Проведенный анализ макроостатков растений позволил установить многократные незначительные изменения увлажненности с периодичностью от десятков до сотни лет [Анисимов, 2010]. В долине р. Тугуттах изучена линза темно-коричневого слабо разложившегося слоистого осоково-злакового торфа с прослоями толстошлирового льда (до 2 см) мощностью 1.1 м. С глубины 0.3 м она датирована  $1530 \pm 80$  лет (ЛУ-1473) и на 1.0–1.1 м от кровли слоя –  $6250 \pm 390$  лет (ЛУ-1470) [Makeev и др., 1989].

Как следует из палеотемпературных реконструкций по результатам различных видов анализов [Васильчук А.К., 2003; Kienast et al., 2011; Zimmermann et al., 2017], в арктических районах Северо-Восточной Сибири в течение позднего неоплейстоцена отмечались периоды с достаточно высокими летними температурами и длительным вегетационным периодом, что обеспечивало развитие небольших массивов древесной и крупнокустарниковой растительности далеко за полярным кругом. В частности, на о. Котельный, по данным датирования древесных остатков, это период 48–35 тыс. лет назад, а на о. Большой Ляховский период оптимума позднего неоплейстоцена установлен в интервале 48–38 тыс. лет назад [Wetterich et al., 2014]. Отложения ледового комплекса на о. Котельный начали формироваться не позднее 55 тыс. лет назад (в северо-западной части острова и устье р. Хомурганнах) [Schirrmeister et al., 2011] и завершили формироваться 11–10 тыс. лет назад [Makeev et al., 2003].

Во время совместной российско-германской экспедиции на Новосибирский архипелаг в 2002 г. были изучены пять обнажений ледового комплекса [Schirrmeister et al., 2002]. На мысе Анисий Л. Ширрмайстером и Т. Кузнецовой с коллегами [Schirrmeister et al., 2003] было найдено *in situ* более 30 костей мамонтов и лошадей. Важным моментом является находка Т. Кузнецовой двух голоценовых костей лошади (датированных  $3000 \pm 45$  и  $2800 \pm 120$  лет, указывающих, что даже в позднем голоцене ландшафты были достаточно продуктивными, чтобы популяция лошадей могла существовать). Летом 2018 г. на о. Котельный в приливной зоне А. Протопоповым с коллегами были обнаружены останки взрослой особи карликового мамонта (часть передней ноги и лопатка),

изучение и особенно датирование которых, возможно, “прольет свет” на развитие поздненеоплейстоцен-голоценовой мамонтовой популяции [На острове..., 2018].

Палинологический анализ для изучения подземных льдов был впервые использован при проведении исследований на о. Котельный. Б.Н. Городков отобрал один образец из льда массой более 20 кг. Из 664 пылевых зерен Р.В. Федорова определила 4 % древесной пыльцы, 80 % пыльцы трав и кустарничков и 16 % спор [Гричук, Федорова, 1956]. Часть пыльцы была переотложена из дочетвертичных пород. Среди пыльцы древесных пород преобладала пыльца *Pinus sibirica*, *P. sylvestris*, с участием пыльцы *Picea*, *Betula* и *Alnus*. Среди трав и кустарничков доминировала пыльца польни *Artemisia* (52 %) и *Roaseae* (35 %); встречена не определяемая до семейства недоразвитая трехбороздная пыльца, а также пыльца семейств *Chenopodiaceae*, *Caryophyllaceae*, *Ericaceae*. Пыльца ивы и осоковых не была обнаружена, как и пыльца лиственницы, несмотря на хорошие условия для сохранения ее во льду [Гричук, Федорова, 1956]. Б.Н. Городков полагал, что это был образец пластового льда, авторам же представляется, что это образец поздненеоплейстоценового жильного льда, который отражает обобщенный спектр весеннего пылевого дождя в позднем неоплейстоцене.

### Изотопный состав

#### поздненеоплейстоценовых ледяных жил

Полученные авторами вариации значений  $\delta^{18}\text{O}$  в поздненеоплейстоценовых ледяных жилах на о. Котельный в долине р. Балыктах (от  $-30.0$  до  $-27.4$  ‰ в жилах нижнего яруса и от  $-22.9$  до  $-27.1$  ‰ в жилах верхнего яруса) демонстрируют явное повышение значений  $\delta^{18}\text{O}$  (в среднем на 3–5 ‰) на заключительной фазе позднего неоплейстоцена (от 23 до 10 тыс. лет назад). Ранее полученные данные изотопного состава ледяных жил в южной части острова удовлетворительно согласуются с результатами настоящей статьи.

Бликие изотопные вариации отмечены в ледяных жилах, исследованных в едомных толщах Новосибирских островов. На о. Большой Ляховский (близ Зимовья) ледяные жилы в типично едомной толще охарактеризованы средними значениями  $\delta^{18}\text{O}$  от  $-32.5$  до  $-28.5$  ‰, а в ледяных жилах из аласов диапазон  $\delta^{18}\text{O}$  составил от  $-26.5$  до  $-21.0$  ‰ (в среднем  $\delta^{18}\text{O} = -24.5$  ‰). Во льду современных ледяных жил на пойме р. Зимовье значения  $\delta^{18}\text{O}$  составляют в среднем  $-20.4$  ‰ [Meyer et al., 2002; Wetterich et al., 2014]. На о. Жонхова значения  $\delta^{18}\text{O}$  в ПЖЛ, залегающих в едомной толще, варьируют от  $-28.65$  до  $-27.85$  ‰ (в среднем  $-28.5$  ‰), а в голоценовых ПЖЛ – от  $-22.02$  до  $-19.97$  ‰ [Павлова и др., 2015]. В едом-

ном комплексе на побережье Ойгосского Яра средние значения  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$  равны  $-31$  и  $-240$  ‰. Голоценовые ледяные жилы, расположенные в термокарстовом понижении Ойгосского Яра и датированные 11.5–3.6 калиб. тыс. лет назад с ярко выраженным торфяным горизонтом, датированным примерно 9.3 калиб. тыс. лет назад, характеризовались существенно более высокими значениями  $\delta^{18}\text{O}$  и  $\delta^2\text{H}$ , составляющими  $-25$ ,  $-26$  ‰ и  $-190$ ,  $-200$  ‰ соответственно [Opel et al., 2017]. На южном берегу о. Котельный из гравелистых песков, содержащих своеобразные ледяные жилы с округлыми головами (рис. 7), получены наиболее древние датировки растительных остатков и мха  $45\,960 \pm 2460$  /  $-1880$  лет (KIA-25741) и  $52\,790 \pm 4110$  /  $-2710$  лет (KIA-25743) [Schirmermeister et al., 2011]. Значения  $\delta^{18}\text{O}$  в этих ледяных жилах, полученные А.Ю. Деревягиным с соавт. [2007], составили от  $-31.0$  до  $-26.2$  ‰ (среднее значение  $-29.5$  ‰), значения  $\delta^2\text{H}$  – от  $-240.9$  до  $-208.4$  ‰ (среднее  $-229.9$  ‰), значения  $d_{\text{exc}}$  – от 1.5 до 8.0 ‰ (среднее 5.9 ‰) (см. рис. 7). В исследованном авторами голоценовом жильном льду значения дейтериевого эксцесса в целом выше (среднее 10.4 ‰), чем полученные А.Ю. Деревягиным и др. Это может указывать на усиление влияния Атлантики и дальнего переноса воздушных масс на формирование снежного покрова и атмосферных осадков на о. Котельный в голоцене.

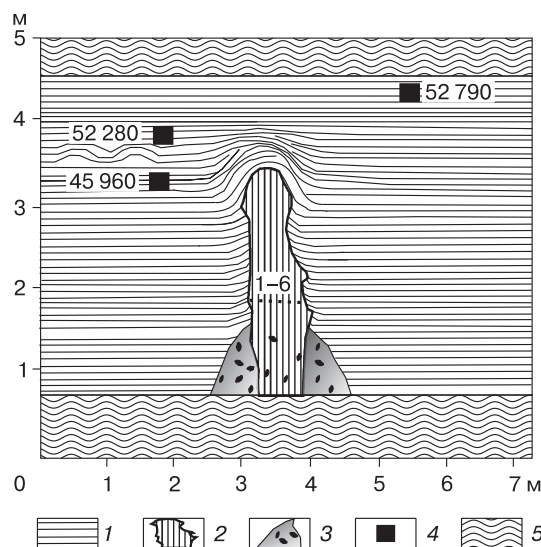


Рис. 7. Поздненеоплейстоценовый ПЖЛ на южном побережье о. Котельный, в котором произведен обор образцов для изотопных определений [Деревягин и др., 2007; Schirmermeister et al., 2003, 2011].

1 – едомные отложения; 2 – погребенная сингенетическая ледяная жила (точки 1–6 – места отбора образцов); 3 – песок с гравием; 4 – отбор образцов для радиоуглеродных определений и их возраст; 5 – оплывины.

**Палеотемпературные реконструкции,  
среднеянварские, среднезимние температуры  
на о. Котельный в позднем неоплейстоцене  
и голоцене**

Выполненные изотопно-кислородные определения позволяют с высокой степенью точности найти среднезимние ( $t_{\text{ср.з}}$ ) и среднеянварские ( $t_{\text{я}}$ ) температуры во время формирования ПЖЛ на о. Котельный с использованием известных уравнений взаимосвязи зимних температур воздуха и изотопного состава жил ( $\delta^{18}\text{O}_{\text{ж}}$ ) [Vasil'chuk, 1991]

$$t_{\text{ср.з}}^{\circ} = \delta^{18}\text{O}_{\text{ж}} (\pm 2^{\circ}\text{C}); t_{\text{я}}^{\circ} = 1.5 \delta^{18}\text{O}_{\text{ж}} (\pm 3^{\circ}\text{C}).$$

Эти уравнения, выведенные для современных жилых ростков севера криолитозоны России, хорошо аппроксимируют и данные по жилым росткам Арктических островов (табл. 3).

Значения  $\delta^{18}\text{O}$  в позднеоплейстоценовых сингенетических ПЖЛ, формировавшихся на Котельном, изменяются существенно, вариации  $\delta^{18}\text{O}$  превышают 6 ‰ (от  $-30.6$  до  $-24.0$  ‰), а в голоценовых ПЖЛ незначительно – не более 1.5 ‰ (от  $-23.1$  до  $-21.6$  ‰). Значения среднеянварских температур в позднем неоплейстоцене менялись более чем на  $10-12^{\circ}\text{C}$ , в то время как в голоцене эти вариации, по-видимому, не превышали  $2^{\circ}\text{C}$ . Среднезимние температуры воздуха в позднем неоплейстоцене были ниже на  $3-5^{\circ}\text{C}$ , а среднеянварские – ниже на  $5-8^{\circ}\text{C}$ , чем в голоцене.

Сравнивая вариации  $\delta^{18}\text{O}$  в позднеоплейстоценовых и голоценовых сингенетических ПЖЛ о. Котельный с таковыми на других островах Восточной Арктики (табл. 4), можно видеть, что в голоцене палеотемпературные и палеогеокриологические показатели практически идентичны, а в позднем неоплейстоцене отмечаются существенные, пока еще не полностью объяснимые, но достаточно любопытные различия. Например, из срав-

нения изотопных данных для разных периодов позднего неоплейстоцена о. Котельный и о. Айон следует, что  $35-25$  тыс. лет назад они достаточно близки, а  $22-12$  тыс. лет назад в жилах о. Котельный фиксируются заметно более высокие значения  $\delta^{18}\text{O}$ , т. е. климат, возможно, был менее суровым зимой  $22-12$  тыс. лет назад, и это было ранее замечено в целом ряде криолитологических опорных разрезов Сибири [Васильчук, 1992, 2006].

Явный положительный сдвиг значений  $\delta^{18}\text{O}$  в голоценовых ледяных жилах относительно позднеоплейстоценовых отмечен на островах Новосибирского архипелага и в устье р. Лены, что отражает повышение среднезимней температуры воздуха в голоцене в среднем на  $5-7^{\circ}\text{C}$  в этом регионе российской Арктики.

Согласно полученным данным, ПЖЛ, формировавшиеся на о. Котельный  $50-45$  тыс. лет назад, характеризуются средним значением  $\delta^{18}\text{O}$ , равным  $-29.5$  ‰, это наиболее низкие средние значения из всего ряда данных по о. Котельный.

Палинологическая характеристика, полученная для интервала  $36.6-35.5$  тыс. калиб. лет, свидетельствует о значительном улучшении условий вегетации, которое отразилось в развитии биоценозов с участием лиственницы и березы. Если учесть более раннюю датировку древесины на о. Котельный в интервале  $47.6-39.5$  тыс. калиб. лет [Галанин и др., 2015], можно предположить по меньшей мере два эпизода существенного улучшения условий вегетации на территории о. Котельный от  $47$  до  $39$  и от  $36.6$  до  $35.5$  тыс. лет назад. Отметим, что для о. Большой Ляховский подобные условия оптимума для МИС-3 С. Веттерихом с коллегами определены во временном интервале  $48-38$  тыс. калиб. лет, а для дельты р. Лены –  $40-32$  тыс. калиб. лет [Wetterich et al., 2014]. Для интервала  $35-25$  тыс. лет назад среднее значение  $\delta^{18}\text{O}$  в ПЖЛ составило  $-29.0$  ‰.

**Таблица 3. Значения  $\delta^{18}\text{O}$  в ростках современных сингенетических повторно-жилых льдов на островах Восточной Арктики России (по: [Васильчук, 1992], с исправлениями и дополнениями)**

| Местоположение        | Координаты                                  | $\delta^{18}\text{O}$ , ‰ | $\Sigma t_{\text{з}}$ | $t_{\text{ср.з}}$ | $t_{\text{я}}$ | $t_{\text{гр}}$ |
|-----------------------|---------------------------------------------|---------------------------|-----------------------|-------------------|----------------|-----------------|
| О. Генриетты          | $77^{\circ}06'$ с.ш., $156^{\circ}30'$ в.д. | $-15.3$                   | $-5330$               | $-17$             | $-27$          | $-12$           |
| О. Жохова             | $76^{\circ}09'$ с.ш., $152^{\circ}43'$ в.д. | $-20.0$                   | $-5363$               | $-18$             | $-29$          | $-13$           |
| О. Котельный          | $75^{\circ}27'$ с.ш., $140^{\circ}50'$ в.д. | $-18.1$                   | $-5408$               | $-19$             | $-29$          | $-14$           |
| Земля Бунге*          | $75^{\circ}24'$ с.ш., $141^{\circ}16'$ в.д. | $-17.6$                   | $-5989$               | $-21$             | $-28$          | $-14$           |
| О. Малый Ляховский    | $74^{\circ}07'$ с.ш., $140^{\circ}40'$ в.д. | $-18.0$                   | $-5408$               | $-20$             | $-31$          | $-14$           |
| О. Большой Ляховский* | $74^{\circ}07'$ с.ш., $140^{\circ}40'$ в.д. | $-20.4$                   | $-5400$               | $-20$             | $-31$          | $-14$           |
| О. Новая Сибирь       | $75^{\circ}03'$ с.ш., $148^{\circ}28'$ в.д. | $-18.0$                   | $-5500$               | $-20$             | $-30$          | $-14$           |
| О. Четырехстолбовый   | $70^{\circ}47'$ с.ш., $161^{\circ}36'$ в.д. | $-20.0$                   | $-5143$               | $-19$             | $-30$          | $-13$           |
| О. Айон               | $69^{\circ}47'$ с.ш., $168^{\circ}39'$ в.д. | $-21.0$                   | $-5047$               | $-20$             | $-29$          | $-12$           |

Примечание.  $\Sigma t_{\text{з}}$  – сумма зимних температур воздуха,  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{сут}$ ;  $t_{\text{ср.з}}$ ,  $t_{\text{я}}$  – среднезимние и среднеянварские температуры воздуха,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_{\text{гр}}$  – среднегодовые температуры грунта без снежного и растительного покрова,  $^{\circ}\text{C}$ .

\* По: [Деревягин и др., 2007].

Таблица 4. Значения  $\delta^{18}\text{O}_{\text{ж}}$  в позднеплейстоценовых и голоценовых сингенетических повторно-жильных льдах на островах Восточной Арктики России (по: [Васильчук, 1992], с исправлениями и дополнениями\*)

| Опорный разрез              | Палеорекострукции                          |                               |                           |                        |                         | Современные значения                       |                               |                           |                        |                         |
|-----------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------|---------------------------|------------------------|-------------------------|
|                             | $\delta^{18}\text{O}_{\text{ж}}, \text{‰}$ | $\Sigma t_{\text{з}}^{\circ}$ | $t_{\text{ср.з}}^{\circ}$ | $t_{\text{я}}^{\circ}$ | $t_{\text{гр}}^{\circ}$ | $\delta^{18}\text{O}_{\text{ж}}, \text{‰}$ | $\Sigma t_{\text{з}}^{\circ}$ | $t_{\text{ср.з}}^{\circ}$ | $t_{\text{я}}^{\circ}$ | $t_{\text{гр}}^{\circ}$ |
| <i>50–45 тыс. лет назад</i> |                                            |                               |                           |                        |                         |                                            |                               |                           |                        |                         |
| О. Котельный**              | –29.5                                      | –7400                         | –30                       | –44                    | –18                     | –18                                        | –5408                         | –19                       | –29                    | –13                     |
| О. Большой Ляховский        | –30.0                                      | –7500                         | –30                       | –45                    | –18                     | –20                                        | –5400                         | –20                       | –31                    | –14                     |
| <i>35–25 тыс. лет назад</i> |                                            |                               |                           |                        |                         |                                            |                               |                           |                        |                         |
| О. Котельный                | –29.0                                      | –7250                         | –29                       | –43                    | –19                     | –18                                        | –5408                         | –19                       | –29                    | –13                     |
| О. Жохова                   | –28.5                                      | –7150                         | –28                       | –43                    | –19                     | –20                                        | –5363                         | –18                       | –29                    | –13                     |
| О. Большой Ляховский        | –31.5                                      | –7870                         | –32                       | –48                    | –20                     | –20                                        | –5400                         | –20                       | –31                    | –13                     |
| О. Айон                     | –31.0                                      | –7750                         | –31                       | –46                    | –19                     | –21                                        | –5047                         | –20                       | –29                    | –12                     |
| <i>22–12 тыс. лет назад</i> |                                            |                               |                           |                        |                         |                                            |                               |                           |                        |                         |
| О. Котельный                | –25.0                                      | –6250                         | –25                       | –37                    | –16                     | –18                                        | –5408                         | –19                       | –29                    | –13                     |
| О. Айон                     | –29.5                                      | –7400                         | –30                       | –44                    | –18                     | –21                                        | –5047                         | –20                       | –29                    | –12                     |
| <i>9–2 тыс. лет назад</i>   |                                            |                               |                           |                        |                         |                                            |                               |                           |                        |                         |
| О. Котельный                | –22.5                                      | –5600                         | –22                       | –34                    | –13                     | –18                                        | –5408                         | –19                       | –29                    | –13                     |
| О. Большой Ляховский        | –24.5                                      | –6100                         | –24                       | –36                    | –15                     | –20                                        | –5400                         | –20                       | –31                    | –14                     |
| О. Малый Ляховский          | –21.0                                      | –5500                         | –21                       | –32                    | –13                     | –18                                        | –5408                         | –20                       | –31                    | –14                     |
| О. Жохова                   | –21.0                                      | –5300                         | –21                       | –32                    | –11                     | –20                                        | –5363                         | –18                       | –29                    | –13                     |
| О. Айон                     | –22.0                                      | –5400                         | –22                       | –33                    | –12                     | –21                                        | –5047                         | –20                       | –29                    | –12                     |

\* Изотопные данные по жилам о. Большой Ляховский дополнены из работы [Meyer et al., 2002], о. Жохова из [Павлова и др., 2009].

\*\* Данные из работ [Деревягин и др., 2007; Schirrmeister et al., 2003].

Палинологическая характеристика торфяника, датированного в интервале 34–29 тыс. калиб. лет назад [Ложкин, 1977], отражает развитие мозаичной растительности с участием кустарников. Согласно определениям остатков семян, условия вегетационного периода были существенно лучше по сравнению с современными. По данным Е.Ю. Павловой с соавт. [2009], растительный покров острова в интервале 28–26 тыс. калиб. лет назад характеризовался развитием низинных травяно-гипновых фитоценозов. Условия повышенного периодического избыточного увлажнения реконструированы для периода 26–23 тыс. калиб. лет назад, растительность была представлена злаково-гипновыми, осоково-злаково-гипновыми и гипновыми тундровыми фитоценозами эвтрофного типа [Павлова и др., 2009]. В интервале 22–12 тыс. лет назад среднее значение  $\delta^{18}\text{O}$  составило –25.0 ‰. В период 23–19 тыс. калиб. лет назад на о. Котельный вследствие возрастания аридности были развиты преимущественно злаковые и злаково-попынные сообщества с участием растений открытых каменистых местообитаний [Макеев и др., 1989; Павлова и др., 2009]. В течение периода 19.0–14.5 тыс. калиб. лет назад, согласно данным палинологического анализа, на о. Котельный растительный покров не был сплошным, пыльцевая продуктивность растений была чрезвычайно низ-

кой, поэтому в палиносpectрах отмечено доминирование хорошо переносимой ветром пыльцы полыни и злаков, на отдельных участках, возможно, преобладали попынно-злаковые и попынные фитоценозы. После 14.5–12.5 тыс. калиб. лет назад [Макеев и др., 1989; Makeev et al., 2003] растительность на острове была представлена травяными осоково-злаковыми фитоценозами. Отдельные участки были заняты группировками растений открытых каменистых местообитаний. В конце позднего неоплейстоцена (11.0–2.5 калиб. лет) произошла смена попынно-злаковых и злаковых фитоценозов злаково-осоковыми и злаково-осоково-разнотравными тундрами с более широким развитием кустарничково-травяных и травяно-кустарниковых тундр.

В интервале 9–2 тыс. лет назад среднее значение  $\delta^{18}\text{O}$  составило –22.5 ‰. На основе данных палинологического анализа в течение этого интервала времени Д.П. Пономарева [Makeev et al., 2003] выделила три периода существенных изменений растительного покрова. Период 9–8 тыс. лет назад характеризуется как время понижения летних температур и уменьшения роли кустарников в растительном покрове. В интервале 8–5 тыс. лет назад вначале произошло улучшение условий вегетационного периода, что привело к распространению крупнокустарниковой растительности,

а затем снижение летних температур и распространение полярно-злаковых растительных ассоциаций с карликовой березкой. Позже 5 тыс. лет назад растительность острова приобрела черты, близкие к современным, но, по мнению Д.П. Пономаревой [Makeev et al., 2003], карликовая березка еще встречалась на фоне осоково-злаковых тундр.

### ВЫВОДЫ

1. Вариации значений  $\delta^{18}\text{O}$  в позднелепестовых ПЖЛ на о. Котельный превышают 6 ‰, что указывает на значительную изменчивость зимних климатических условий в позднем ледяном периоде. Амплитуда изменения значений среднеянварских температур составляла более 10 °C.

2. В верхней части позднелепестовых ПЖЛ на о. Котельный отмечено очень редкое явление – более позднее внедрение голоценовых жил.

3. Вариации значений  $\delta^{18}\text{O}$  в голоценовых ПЖЛ не превышают 2 ‰, что свидетельствует о стабильности зимних климатических условий в голоцене на о. Котельный. Среднегодовые значения среднеянварских температур в голоцене изменялись не более чем на 3 °C.

4. На о. Котельный в течение позднего ледяного периода отмечаются периоды с достаточно высокими летними температурами и длительным вегетационным периодом, что обеспечивало развитие небольших массивов древесной и крупнотравянистой растительности на территории острова от 47 до 39 и от 36.6 до 35.5 тыс. лет назад.

5. В начальный период голоцена (10–7 тыс. лет назад) на Котельном были условия для развития крупнотравянистой растительности и быстрого накопления торфяников.

6. Зимы в холодные периоды каргинского времени были заметно холоднее зим в сарганское время, при этом условия вегетационного периода в течение каргинского интервала были существенно благоприятнее сарганского.

*Авторы глубоко признательны канд. геогр. наук Ю. Чижовой за помощь в проведении изотопных определений и консультации. Авторы благодарят проф. Р. Вайкмяэ за изотопные определения, канд. геогр. наук Н. Белову за предоставленные фотографии и Б. Петрова за помощь в отборе образцов на голоценовом разрезе острова Котельный.*

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 18-05-60272 Арктика; 17-05-00794, 17-05-00793), бюджетном финансировании Московского государственного университета им. М.В. Ломоносова с использованием масс-спектрометрического оборудования, приобретенного на средства Программы развития МГУ.*

### Литература

**Анисимов М.А.** Развитие природной среды Новосибирских островов в голоцене: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. СПб., 2010, 24 с.

Anisimov, M.A., 2010. The Holocene Climate and Environment of the New Siberian Archipelago. Author's Abstract, Candidate Thesis (Geography). St. Petersburg, 24 pp. (in Russian)

**Васильчук А.К.** Отражение событий Хайнриха на датированных по радиоуглероду спорово-пыльцевых диаграммах повторно-жильных льдов и вмещающих их едомных отложений низовий р. Колымы // Криосфера Земли, 2003, т. VII, № 4, с. 3–13.

Vasil'chuk, A.C., 2003. Appearance of Heinrich events in radio-carbon dated pollen diagrams of ice wedges and its surrounding yedoma sediments of the lower Kolyma River. Earth's Cryosphere VII (4), 3–13.

**Васильчук Ю.К.** Изотопно-кислородный состав подземных льдов (опыт палеогеокриологических реконструкций): В 2 т. М., ОТП РАН; МГУ; ПНИИИС, 1992, т. 1, 420 с.; т. 2, 264 с. Vasil'chuk, Yu.K., 1992. Oxygen Isotope Composition of Ground Ice (Application to Paleogeocryological Reconstructions), Theor. Probl. Dept., RAS, Moscow University, Research Institute of Engineering for Construction (PNIIS), Moscow, Book 1, 420 pp, Book 2, 264 pp. (in Russian)

**Васильчук Ю.К.** Повторно-жильные льды: гетероцикличность, гетерохронность, гетерогенность. М., Изд-во Моск. ун-та, 2006, 404 с.

Vasil'chuk, Yu.K., 2006. Ice Wedge: Heterocyclity, Heterogeneity, Heterochronicity. Moscow University Press, Moscow, 404 pp. (in Russian)

**Васильчук Ю.К., Васильчук А.К.** Зимние палеотемпературы воздуха в низовьях Колымы 30–12 тысяч лет назад по результатам изучения изотопного состава едомы Плахинского Яра // Криосфера Земли, 2018, т. XXII, № 5, с. 3–19.

Vasil'chuk, Yu.K., Vasil'chuk, A.C., 2018. Winter air paleotemperatures at 30–12 Ka BP in the lower Kolyma River, Plakhinskii Yar Yedoma: Evidence from stable isotopes. Earth's Cryosphere XXII (5), 3–16.

**Васильчук Ю.К., Макеев В.М., Маслаков А.А. и др.** Палеогеокриологические условия формирования позднелепестовых и голоценовых повторно-жильных льдов острова Котельный // Материалы Пятой конф. геокриологов России (Москва, 14–17 июня 2016 г.). М., Унив. книга, 2016, т. 2, с. 284–291.

Vasil'chuk, Yu.K., Makeev, V.M., Maslakov, A.A., Budantseva, N.A. Vasil'chuk, A.C., 2016. Paleogeocryological conditions of Late Pleistocene and Holocene ice wedges in Koteln Island, in: Proc. 5th Conf. of Russian Geocryologists, Moscow, 14–17 June, 2016. Univ. Kniga, vol. 2, pp. 284–291. (in Russian)

**Галанин А.А., Дьячковский А.П., Лыткин В.М. и др.** Результаты определения абсолютного возраста образцов в радиоуглеродной лаборатории Института мерзлотоведения СО РАН // Наука и образование, 2015, № 4 (80), с. 45–49.

Galanin, A.A., Dyachkovskiy, A.P., Lytkin, V.M., Burnasheva, M.P., Shaposhnikov, G.I., Kut', A.A., 2015. Absolute ages of samples determined at the Radiocarbon Laboratory at the Institute of Permafrost (Yakutsk). Nauka i Obrazovanie, No. 4 (80), 45–49.

**Городков Б.Н.** Приледниковые ландшафты плейстоцена на севере Азии // Докл. АН СССР, 1948, т. 61, № 3, с. 513–516. Gorodkov, B.N., 1948. Pleistocene periglacial landscapes in northern Asia. Dokl. AN SSSR 61 (3), 513–516.

**Городков Б.Н.** Растительность и почвы о. Котельного (Новосибирский архипелаг) // Растительность Крайнего Севера СССР и ее освоение, вып. 2 / Под ред. Б.А. Тихомирова. Л., Изд-во АН СССР, 1956, с. 7–132.

- Gorodkov, B.N., 1956. Vegetation and soils of Kotelnny Island (New Siberian Archipelago), in: Tikhomirov, B.A. (Ed.), The Vegetation and Land Use in the USSR Far North, Iss. 2, USSR Academy Publishers, Leningrad, pp. 7–132. (in Russian)
- Гричук В.П., Федорова Р.В.** К вопросу о характеристике приледниковой растительности четвертичного периода на севере Азиатского материка // Изв. АН СССР. Сер. геогр., 1956, № 2, с. 66–71.
- Grichuk, V.P., Fedorova, R.V., 1956. On Quaternary periglacial vegetation in northern Asia. Izv. AN SSSR, Ser. Geogr. No. 2, 66–71.
- Деревиagin А.Ю., Куницкий В.В., Мейер Х.** Песчано-ледяные жилы на крайнем севере Якутии // Криосфера Земли, 2007, т. XI, № 1, с. 62–71.
- Dereviagin, A.Yu., Kunitsky, V.V., Meyer, H., 2007. Composite wedges in the North of Yakutia. Earth's Cryosphere XI (1), 62–71.
- Качинский В.Л.** Техногенные углеводороды в почвах аркто-тундровых ландшафтов острова Большой Ляховский: Новосибирские острова: Дис. ... канд. геогр. наук. М., 2014, 176 с.
- Kachinskiy, V.L., 2014. Industrial Hydrocarbons in Arctic Tundra Soils of Bolshoy Lyakhovskiy Island, New Siberian Archipelago. Candidate Thesis (Geography), Moscow, 176 pp. (in Russian)
- Климат острова Котельный** [Электрон. ресурс]. – <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/21432.htm> (дата обращения: 22.05.2018).
- Climate of Kotelnny Island. <http://www.pogodaiklimat.ru/climate/21432.htm> (submittal date: 22.05.2018).
- Ложкин А.В.** Радиоуглеродные датировки верхнеплейстоценовых отложений Новосибирских островов и возраст едомной свиты Северо-Востока СССР // Докл. АН СССР, 1977, т. 235, № 2, с. 435–437.
- Lozhkin, A.V., 1977. Radiocarbon ages of Late Pleistocene deposits in the New Siberian Islands and the age of ice complexes in northeastern USSR. Dokl. AN SSSR 235 (2), 435–437.
- Ложкин А.В.** Современный пылевой дождь в Арктических районах Берингии и реконструкция растительности ледниковых интервалов плейстоцена // Четвертичная палеогеография Берингии. Магадан, СВКНИИ ДВО РАН, 2002, с. 13–27.
- Lozhkin, A.V., 2002. Modern pollen rain in Arctic Beringia and vegetation reconstructions for glacial periods of the Pleistocene, in: Quaternary Paleogeography of Beringia. SVKNII DVO RAN, Magadan, pp. 13–27. (in Russian)
- Макеев В.М., Арсланов Х.А., Барановская О.Ф. и др.** Стратиграфия, геохронология и палеогеография позднего плейстоцена и голоцена о-ва Котельного // Бюл. Комиссии по изучению четвертичного периода, 1989, вып. 58, с. 58–69.
- Makeev, V.M., Arslanov, Kh.A., Baranovskaya, O.F. Kosmodamiansky, D.P., Tertychnaya, T.V., 1989. Late Pleistocene and Holocene stratigraphy, geochronology, and paleogeography of Kotelnny Island. Bull. Quaternary Commission 58, pp. 58–69.
- На острове Котельный в Якутии нашли уникальные останки небольшого мамонта** [Электрон. ресурс]. – <http://news.ykt.ru/mobile/article/76179> (дата обращения: 08.10.2018).
- Remnants of a small mammoth discovered in Kotelnny Island in Yakutia, 2018. – URL: <http://news.ykt.ru/mobile/article/76179> (submittal date: 08.10.2018).
- Павлова Е.Ю., Дорожкина М.В., Питулько В.В.** Палеогеографические реконструкции условий развития природной среды на островах Анжу в конце позднего неоплейстоцена // Геология полярных областей Земли: Материалы XLII Тектонического совещания. М., 2009, т. 2, с. 97–101.
- Pavlova, E.Yu., Dorozhkina, M.V., Pitulko, V.V., 2009. The latest Late Pleistocene climate and environment of the Anjou Islands: Paleogeographic reconstructions, in Global Arctic and Subarctic Geology, Proc. XLII Tectonic Conf. Moscow, Volume 2, pp. 97–101. (in Russian)
- Павлова Е.Ю., Иванова В.В., Мейер Х., Питулько В.В.** Изотопный состав ископаемых льдов как индикатор палеоклиматических изменений на севере Новосибирских островов и западе Яно-Индикирской низменности // Материалы IX Всерос. совещания по изучению четвертичного периода (Иркутск, 15–20 сент. 2015 г.). Иркутск, Изд-во Ин-та географии СО РАН, 2015, с. 349–351.
- Pavlova, E.Yu., Ivanova, V.V., Meyer, H., Pitulko, V.V., 2015. The oxygen isotope composition of fossil ice as a climate proxy: case study of the northern New Siberian Islands and the western Yana-Indigirka lowland, in: Proc. IX All-Russian Conf. on the Quaternary, 15–20 September 2015, Irkutsk, V.B. Sochava Institute of Geography, Irkutsk, pp. 349–351. (in Russian)
- Россия Корабельная** [Электрон. ресурс]. – <http://shiphistory.ru/> (дата обращения: 20.11.2018).
- Ship History of Russia. – URL: <http://shiphistory.ru/> Appeal 20 November 2018 (in Russian).
- Сулержицкий Л.Д., Романенко Ф.А.** Возраст и расселение “мамонтовой” фауны азиатского Заполярья (по радиоуглеродным данным) // Криосфера Земли, 1997, т. I, № 4, с. 12–19.
- Sulerzhitsky, L.D., Romanenko, E.A., 1997. Age and distribution of the mammoth fauna of the polar region of Asia (radiocarbon dating results). Earth's Cryosphere I (4), 12–19.
- Толль Э.** Ископаемые ледники Новосибирских островов, их отношение к трупам мамонтов и к ледниковому периоду. На основании работ двух экспедиций, снаряженных императорской Академией Наук, в 1885–1886 и в 1893 годах // Зап. Императ. Рус. Геогр. о-ва по общей географии / Под ред. И.В. Мушкетова. СПб., 1897, т. 32, № 1, 139 с.
- Toll, E., 1897. Fossil glaciers of New Siberian Islands, their relation to mammoth corpses and to the glacial period, from data of two expeditions of 1885–1886 and 1893, supported by the Imperial Academy of Sciences, in: Mushketov, I.V. (Ed.), Reports, Imperial Russian Geographical Society, General Geography, St. Petersburg 32 (1), 139 pp. (in Russian)
- Трошко К.А.** Разработка методики использования радиолокационных данных для тематического картографирования: Автореф. дис. ... канд. геогр. наук. М., 2018, 22 с.
- Troshko, K.A., 2018. Use of Radar Data for Thematic Mapping: Methodological Development. Author's Abstract, Candidate Thesis (Geography). Moscow, 22 pp. (in Russian)
- Belova, N.G., Frolov, D.M., Kizyakov, A.I., Konstantinova, N.G.** Ice Complex on the Southern Coast of Kotelnny Island, New Siberian Islands: New data on Isotopic Composition // Intern. Conf. “Permafrost in XXI Century: basic and applied researches”. Pushchino, Moscow region, Russia, 2015, p. 123–125.
- Bronk Ramsey, C.** Bayesian analysis of radiocarbon dates // Radiocarbon, 2009, vol. 51, iss. 1, p. 337–360.
- Dobrowolska, K.** Weather types at selected meteorological stations in Siberia // Bull. Geography. Phys. Geogr. ser., 2014, No. 7, p. 81–104.
- Kienast, F., Wetterich, S., Kuzmina, S., et al.** Paleontological records indicate the occurrence of open woodlands in a dry inland climate at the present-day Arctic coast in Western Beringia during the Last Interglacial // Quatern. Sci. Rev., 2011, vol. 30, p. 134–159.
- Makeev, V.M., Ponomareva, D.P., Pitulko, V.V., et al.** Vegetation and climate of the New Siberian Islands for the past 15,000 years // Arctic, Antarctic, and Alpine Res., 2003, vol. 35, No. 1, p. 56–66.

- Meyer, H., Dereviagin, A., Siegert, C., et al.** Palaeoclimate reconstruction on Big Lyakhovsky Island, North Siberia – hydrogen and oxygen isotopes in ice wedges // *Permafrost and Periglacial Processes*, 2002, vol. 13, p. 91–105.
- Moriizumi, J., Iida, T., Fukuda, M.** Radiocarbon dating of methane obtained from air in the ice complex (edoma), in Arctic coast area of east Siberia // *Joint Siberian Permafrost Studies between Japan and Russia in 1994: Proc. Third Intern. Sympos. Tsukuba / K. Takahashi, A. Osawa, Y. Kanazawa (eds.). Hokkaido, Japan, Hokkaido Univ. Press, 1995, p. 14–21.*
- Opel, T., Wetterich, S., Meyer, H., et al.** Ground-ice stable isotopes and cryostratigraphy reflect late Quaternary palaeoclimate in the Northeast Siberian Arctic (Oyogos Yar coast, Dmitry Laptev Strait) // *Climate of the Past*, 2017, vol. 13, p. 587–611.
- Reimer, P.J., Bard, E., Bayliss, A., et al.** IntCal13 and Marine13 Radiocarbon age calibration curves 0–50,000 years cal BP // *Radiocarbon*, 2013, vol. 55, iss. 4, p. 1869–1887.
- Schirrmeister, L., Siegert, C., Kuznetsova, T., et al.** Paleoenviromental and paleoclimatic records from permafrost deposits in the Arctic region of Northern Siberia // *Quatern. Intern.*, 2002, vol. 89, p. 7–118.
- Schirrmeister, L., Grosse, G., Kunitsky, V., et al.** Permafrost, periglacial and paleo-environmental studies on New Siberian Islands // *Russian-German Cooperation System Laptev Sea. The expedition Lena 2002 / M.N. Grigoriev, V. Rachold et al. (eds.). Berichte zur Polar- und Meeresforschung. Rep. on Polar and Marine Res.*, 2003, vol. 466, p. 195–261.
- Schirrmeister, L., Kunitsky, V., Grosse, G., et al.** Sedimentary characteristics and origin of the Late Pleistocene Ice Complex on north-east Siberian Arctic coastal lowlands and islands – A review // *Quatern. Intern.*, 2011, vol. 241, No. 1–2, p. 3–25.
- van Geel, B., Protopopov, A., Protopopova, V., et al.** Larix during the Mid-Pleniglacial (Greenland Interstadial 8) on Kotelny Island, northern Siberia // *Boreas*, 2017, vol. 46, p. 338–345, DOI: 10.1111/bor.12216.
- Vasil'chuk, Yu.K.** Paleological permafrost interpretation of oxygen isotope composition of Late Pleistocene and Holocene wedge ice of Yakutia // *Transactions (Doklady) of the USSR Academy of Sciences: Earth Sci. Sections*, 1988, vol. 298, No. 1, p. 56–59 (Publ. by Scripta Technica, Inc. A Wiley Company, N.Y.).
- Vasil'chuk, Yu.K.** Reconstruction of the palaeoclimate of the Late Pleistocene and Holocene of the basis of isotope studies of subsurface ice and waters of the permafrost zone // *Water Resources*, 1991, vol. 17, No. 6, p. 640–647.
- Vasil'chuk, Yu.K., Makeev, V.M., Maslakov, A.A., Budantseva, N.A., Vasil'chuk, A.C., Chizhova, Ju.N.** The oxygen isotope composition of Late Pleistocene and Holocene Ice Wedges of Kotelny Island // *Doklady Earth Sci.*, 2018, vol. 482, pt 1, p. 1216–1220, DOI: 10.1134/S1028334X18090192.
- Wetterich, S., Tumskey, V., Rudaya, N., et al.** Ice Complex formation in arctic East Siberia during the MIS3 Interstadial // *Quatern. Sci. Rev.*, 2014, vol. 84, p. 39–55.
- Zimmermann, H.H., Raschke, E., Epp, L.S., et al.** The history of tree and shrub taxa on Bol'shoy Lyakhovsky Island (New Siberian Archipelago) since the last interglacial uncovered by Sedimentary Ancient DNA and Pollen Data // *Genes*, 2017, vol. 8, No. 273, 28 p.

*Поступила в редакцию 20 июня 2018 г.,  
после доработки – 6 ноября 2018 г.,  
принята к публикации 28 ноября 2018 г.*