ООО «Геомаркетинг»

ООО «Институт геотехники и инженерных изысканий в строительстве»

Ассоциация «Инженерные изыскания в строительстве»

Союз изыскателей

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ИНЖЕНЕРНЫХ ИЗЫСКАНИЙ В СТРОИТЕЛЬСТВЕ В РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

МАТЕРИАЛЫ XV ОБЩЕРОССИЙСКОЙ КОНФЕРЕНЦИИ ИЗЫСКАТЕЛЬСКИХ ОРГАНИЗАЦИЙ

26 – 29 ноября 2019 г.

МОСКВА
2019

Буданцева Н.А.[1], Васильчук Ю.К.[1], Чижова Ю.Н.[2]

[1]МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, кафедра геохимии ландшафтов и географии почв, г. Москва, nadin.budanceva@mail.ru, vasilch_geo@mail.ru
[2]Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН, г. Москва, eacentr@yandex.ru

ГОЛОЦЕНОВЫЕ ПОВТОРНО-ЖИЛЬНЫЕ ЛЬДЫ БЛИЗ ГОРОДА ВОРКУТЫ: ИСТОРИЯ ФОРМИРОВАНИЯ И СОВРЕМЕННАЯ ТЕНДЕНЦИЯ

Цель авторского исследования – установить, что на северо-востоке Восточно-Европейской равнины (в районе г. Воркута) сингенетические повторно-жильные льды активно формировались в течение голоценового оптимума и реконструировать зимние температуры воздуха для этого периода.

г. Воркута расположен на северо-востоке Восточно-Европейской равнины, вблизи подножий Полярного Урала (рис. 1). Климат региона субарктический с длинной холодной зимой и коротким прохладным летом. Зимой часты резкие колебания температуры от –40°С до 0°С и выше вызываются прохождением теплых атмосферных фронтов.

Рис. 1. Район исследований и границы распространения повторно-жильных льдов (ПЖЛ)

Ряды температурных данных доступны по двум метеостанциям района исследований – в г. Воркуте и г. Амдерма (рис. 2). В Воркуте среднегодовая температура воздуха, осредненная за 1947–2011 гг., составила –5,7°С, в то время как среднезимняя и среднеянварская температуры составляют соответственно –16°С и –20,4°С, соответственно [7]. С начала 1960-х гг. очевидно повышение среднегодовой температуры воздуха на 2°С в Воркуте (с –6,1 до –4,3°С) и на 3°С в Амдерме (с –8,2 до –5°С) [10]. Среднее повышение

зимних и январских температур по двум станциям составило порядка 2–3°С, среднее повышение летних температур составило 1,5–2°С.

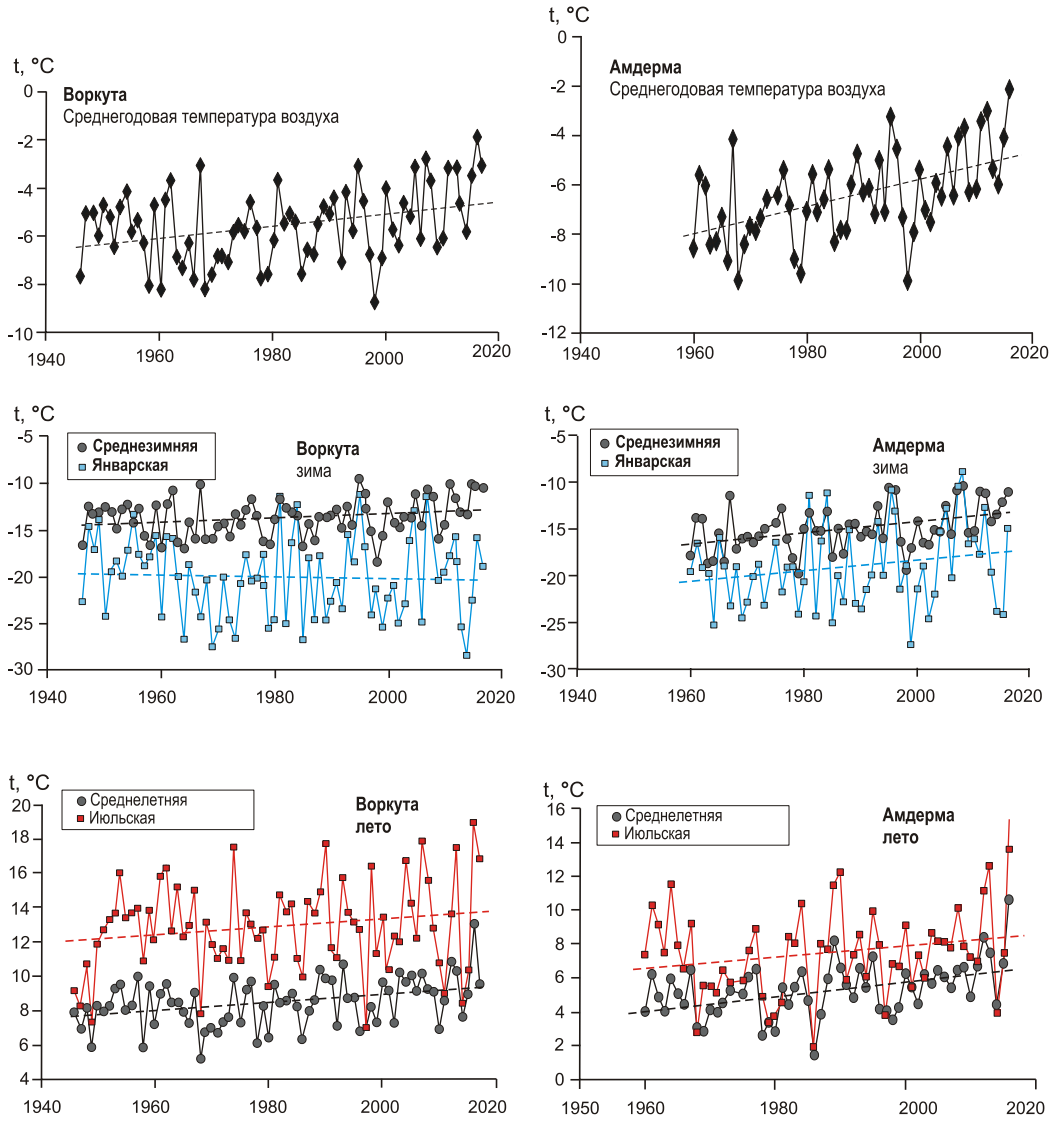


Рис. 2. Вариации температур воздуха на метеостанциях «Воркута» и «Амдерма» за период 1940(1960)–2018 гг.

В 1970-е гг. температура многолетнемерзлых пород (ММП) на глубине нулевых годовых амплитуд варьировала преимущественно от –1 до –3°С, достигая в некоторых местах –5,5°С [8]. По данным на 2007–2011 гг. [7] среднегодовая температура пород на глубине 1 м варьировала от –0,8 до –2,3°С в минеральных отложениях и от –2,2 до –4,1°С в торфе.

Говоря о современных климатических тенденциях, можно отметить очевидное повышение среднегодовых температур воздуха, отмечаемое на севере Восточно-Европейской равнины в последние десятилетия. В районе г. Воркута начало постоянных наблюдений за температурой ММП (1965 г.) почти совпадает с наступлением последнего периода потепления. Мощность

снега в течение этого периода также увеличилась, и сочетание повышения температуры воздуха и мощности снега привело к существенному повышению температуры ММП и началу или усилению их деградации во многих районах. Маломощные изолированные ММП в некоторых случаях полностью протаяли, в районах с бóльшей мощностью ММП образовались новые замкнутые талики, ранее существовавшие талики увеличились по площади и глубине. Среднегодовые скорости повышения температур ММП за период 1950–2009 гг. составили от 0,01°С/год в суглинках до 0,08°С/год в торфяниках [8]. Повсеместное развитие новых таликов привело к наблюдаемому смещению к северу границы сплошного и прерывистого распространения ММП на несколько десятков километров [8].

Северо-восточная часть Восточно-Европейской равнины (Большеземельская тундра) является единственным районом в континентальной Европе, где довольно широко распространены повторно-жильные льды (ПЖЛ). Ареал ПЖЛ в западной части достаточно узкий, это десятки и первые сотни километров с севера на юг. По мере движения на восток он расширяется и достигает максимальной ширины 100 км и более в верховьях р. Лая и в Приуралье (см. рис. 1).

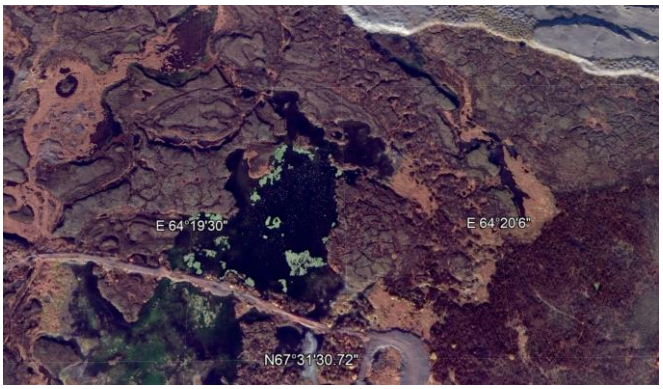
Одно из наиболее южных местонахождений ПЖЛ описано И.А. Казначеевой и Е.А. Шапошниковой [3] в нижнем течении р. Лая (правого притока р. Печора). По данным для этой территории, южная граница распространения погребенных повторно-жильных льдов располагается между изотермами минимальных среднегодовых температур грунта от –2,0 и –2,5°С (примерно 67° с.ш.), а южная граница распространения современного морозобойного растрескивания и формирования повторно-жильных льдов – между изотермами –2,5 и –3,0°С, на широте около 67°30' с.ш. [3].

г. Воркута расположен немного южнее границы растущих повторно-жильных льдов, в области преимущественного распространения погребенных ПЖЛ (см. рис. 1). Голоценовые торфяники с ПЖЛ описаны около Воркуты А.И. Поповым [4]. Высота жил составляла 2,5–3 м, ширина в верхней части варьировала от 0,3–0,5 до 1–2 м. Сингенетическое происхождение изученных жил подтверждается изгибом горизонтов вмещающих отложений на контакте с жилами и увеличением мощности торфа от жилы к центру полигона.

В ходе полевых исследований в июле 2003 г. авторами была отмечена полигональная сеть с отчетливыми валиками и свежими морозобойными трещинами на оторфованной поверхности второй аллювиальной террасы р. Воркута (в 20–30 км южнее города), что позволяет предположить современный рост ПЖЛ несмотря на потепление климата в регионе.

Детально был исследован полигональный торфяник в угольном карьере Юньягинский (рис. 3), в 13–14 км восточнее г. Воркуты (67°31'0" с.ш., 64°23'10" в.д.). Мощность торфа варьировала от 2,5–3 м в центральной части полигонов до 1,5–2 м под межполигональными канавками. Торф подстилается в

основном озерными суглинками и локально песком. ПЖЛ были вскрыты на глубине 0,7–1 м в некоторых обнажениях торфяника.



а

б

Рис. 3. Угледобывающий карьер Юньягинский (район г. Воркута), в верхней части которого вскрыты голоценовые повторно-жильные льды

В периферийной части полигонального блока торфяника была исследована хорошо вскрытая ледяная жила (рис. 4, 5, *а*). Вмещающими жилу отложениями являлся торф и озерный суглинок. В суглинке преобладала сетчатая криотекстура с ледяными линзами мощностью до 2–3 см. На сингенетический рост ПЖЛ указывают резкий подъем основания торфяника на боковых контактах с жилой. Максимальная ширина жилы в верхней части составила 0,5 м, вертикальная мощность составила 2,5 м.

Рис. 4. Голоценовая ледяная жила, вскрытая в верхней части карьера Юньягинский

В центральной части полигонального блока торфяника, в 200 м от изученной ледяной жилы была встречена грунтово-торфяная жила на глубине 2,7 м (рис. 5, *б*). Вертикальный размер жилы 1,4 м, она сложена тремя

элементарными торфяными жилками толщиной 6-10 см, разделенных вертикальными прожилками суглинка с горизонтально-слоистой криотекстурой. Более мелкие торфяные жилы высотой не более 1 м были встречены на расстоянии 3 м.

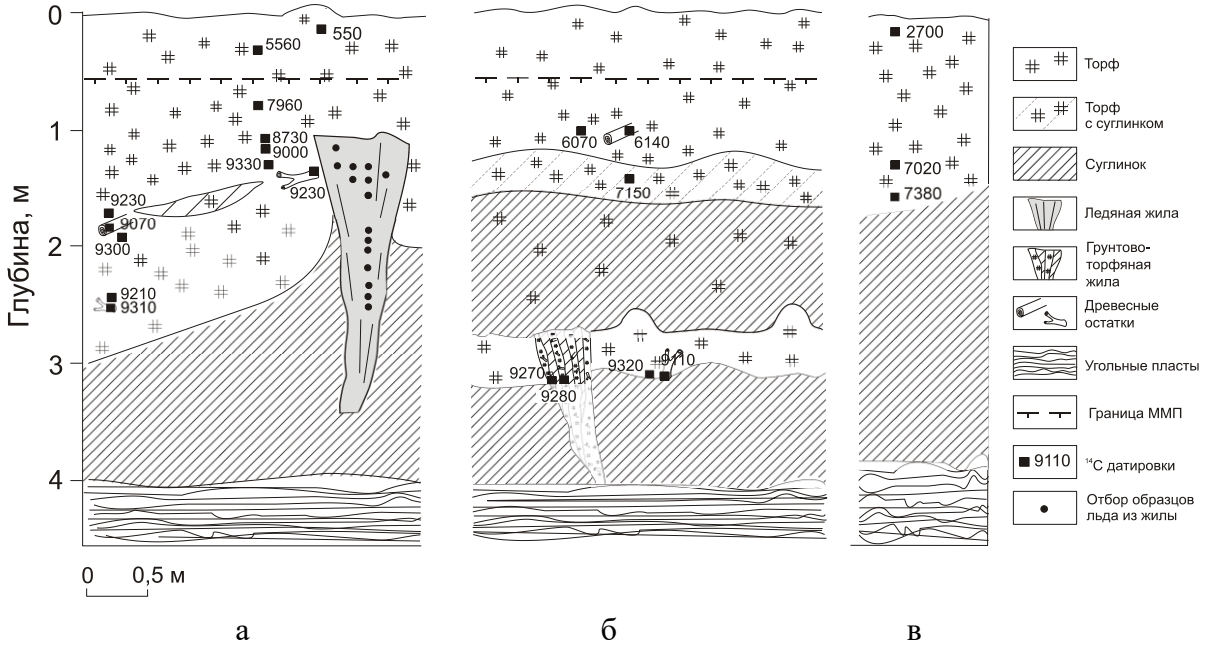


Рис. 5. Фрагменты Юньягинского торфяника (район г. Воркута), исследованные в 2003 (а, б) и 2018 гг. (в), радиоуглеродные датировки и схема отбора образцов жильного льда для анализа стабильных изотопов

По авторским наблюдениям в декабре 2018 г. Юньягинский торфяник был немерзлым до глубины 2–2,5 м, что связано с глубоким протаиванием в летний период и ледяные жилы в нем уже не встречаются. В этой связи редкие находки повторно-жильных льдов являются артефактами и носителями важной палеоклиматической информации.

В центральной части торфяника была получена серия ^{14}С датировок от 9,3 до 6,1 тыс. лет (см. рис. 5, *б*), в периферийной части торфяника (где вскрыта ледяная жила) получены датировки по торфу от 9,3 тыс. лет в основании торфяника до 0,55 тыс. лет на поверхности (см. рис. 5, *а*).

Согласно полученным ^{14}С датировкам аккумуляция Юньягинского торфяника началась после осушения озера около 9,3 тыс. лет назад, синхронно с многолетним промерзанием и ростом ПЖЛ. ^{14}С датировка 0,55 тыс. лет в верхней части торфяника показывает, что торф накапливался в течение большей части голоцена. Наличие стволов и крупных веток в торфе говорит о произрастании в пределах торфяника древесной растительности, которая в настоящее время произрастает на десятки километров южнее. Сингенетический рост жил в торфе подчеркивается изгибанием подошвы торфа от центральной части к боковому контакту с жилой, поэтому начало роста жилы может быть

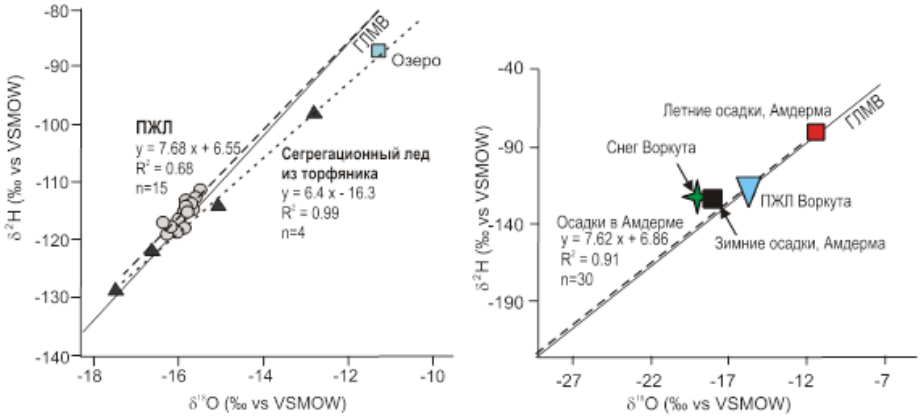
отнесено к 9,2–9 тыс. лет назад. Завершение активного роста жилы датировано 7,9 тыс. лет назад, учитывая ^{14}C датировку торфа на расстоянии 0,3 м над головой жилы. Скорость аккумуляции торфа на первой стадии (синхронной формированию жилы) была очень высокой и составляла не менее 1 м в тысячу лет. Резкое замедление скорости аккумуляции торфа и роста ледяной жилы, скорее всего, связано с иссушением поверхности торфяника.

В центральной части торфяника подтопление и формирование озера около 9,5–9 тыс. лет назад привело к протаиванию ПЖЛ и накоплению озерных суглинков. На этой стадии формировались грунтово-торфяные жилы в результате заполнения морозобойных трещин торфом и суглинком. Вертикальная слоистость торфа и минерального грунта в жиле показывает колебания уровня воды и режима осадконакопления в болоте.

Авторы полагают, что грунтово-торфяная жила в центральной части торфяника первоначально была заполнена грунтом и торфом (т.е. это не псевдоморфоза по ПЖЛ), что может быть доказано ровными боковыми краями каждой элементарной жилки, что было бы невозможно в случае протаивания ПЖЛ и заполнения ее торфом. Близкие ^{14}C датировки торфа из жилы и вмещающего торфяника показывают синхронность их роста в условиях локального обводнения.

Значения стабильных изотопов в повторно-жильном льду варьируют в узком диапазоне: значения $\delta^{18}O$ от –15,45‰ до –16,35‰, значения $\delta^{2}H$ от –111,6 до –119,1‰ и d-excess – от 9,0 до 13,8‰.

Положение значений состава стабильных изотопов в Воркутинской голоценовой жиле вблизи глобальной линии метеорных вод (рис. 6, *а*) указывает на почти полное отсутствие влияния второстепенных процессов и позволяет с уверенностью использовать изотопные данные для палеотемпературных реконструкций.



а б

Рис. 6. Соотношение значений $\delta^{18}O$-$\delta^{2}H$ во льду жилы, сегрегационном льду из торфяника и небольшого озера на поверхности Юньягинского торфяника (а) и сопоставление значений изотопного состава в современных осадках в Воркуте и Амдерме со значением в ледяной жиле в торфянике (б)

Сравнение изотопного состава голоценовых ледяных жил вблизи Воркуты и современных осадков региона показывает, что зимний изотопный сигнал среднего голоцена сравним с современным (рис. 6, *б*).

Применяя уравнение Ю.К. Васильчука [9], описывающее зависимость содержания стабильных изотопов во льду жил со среднезимней ($t_{ср.зим}$) и среднеянварской ($t_{ср.янв}$) температурой воздуха:

$$t_{ср.зим} = \delta^{18}O_{ПЖЛ}\ (\pm\ 2°C), \quad (1)$$

$$t_{ср.янв} = 1.5\delta^{18}O_{ПЖЛ}\ (\pm\ 3°C), \quad (2)$$

можно сделать вывод, что в Воркутинском регионе в течение первой половины голоценового оптимума между 9,2 и 7,9 тыс. лет назад среднезимняя температура воздуха варьировала между –15,5 и –16,5°С и среднеянварская температура воздуха – между –23 и –25°С. Полученные авторами изотопные данные по Воркуте отражают стабильность температурных условий.

Значения $\delta^{18}O$ в современных ледяных жилках возрастом около 100–120 лет в районе исследований (для Воркуты –16‰ [1], вблизи г. Амдермы –15,2‰ [2], на м. Шпиндлера на Югорском п-ове –13,1 и –16,9‰ [6], низовье р. Нгарка-Тамбъяха –19‰ [5]) вполне соответствуют изотопному составу современных зимних осадков региона в Воркуте и Амдерме. Сопоставление изотопного состава голоценовых и современных жил позволяет говорить о близких средних показателях температур воздуха зим голоценового оптимума и современных.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (гранты № 17-05-00793 – радиоуглеродный анализ и № 18-05-60272 – изотопный анализ) и РНФ (грант № 19-17-00126 – обобщение материалов).

Список литературы

1. Васильчук Ю.К. Изотопно-кислородный состав подземных льдов (опыт палеогеокриологических реконструкций). М.: Изд-во Отдела теоретических проблем РАН, Изд-во Московского университета, ПНИИИС. 1992. В 2-х томах. Т. 1. 420 с. Т. 2. 264 с.
2. Васильчук Ю.К., Котляков В.М. Основы изотопной геокриологии и гляциологии. М.: Изд-во Московского университета, 2000. 616 с.
3. Казначеева И.А., Шапошникова Е.А. Повторно-жильные льды западной части Большеземельской тундры // Вестник Московского университета. Серия 4. Геология. 1982. № 1. С. 88–92.
4. Попов А.И. Полигонально-жильный лед в Большеземельской тундре // Подземный лед. М.: Изд-во Московского университета, 1965. Вып. 1. С. 160–166.

5. Стабильные изотопы кислорода и водорода в голоценовых повторно-жильных льдах на западном побережье Байдарацкой губы, в устье реки Нгарка-Тамбьяха / Н.А. Буданцева, Н.Г. Белова, А.К. Васильчук, Ю.К. Васильчук // Арктика и Антарктика. 2018. № 1. С. 76–85.
6. Isotope-geochemical characteristics of TGI at Yugorsky Peninsula and reconstruction of conditions for its formation / M.O. Leibman, A.Yu. Lein, H.-W. Hubberten, B.G. Vanshtein, G.N. Goncharov // Материалы гляциологических исследований. 2001. Вып. 90. С. 30–39.
7. Kaverin D.A., Pastukhov A.V., Mazhitova G.G. Temperature regime of the tundra soils and underlying permafrost (northeast European Russia) // Earth's Cryosphere. 2014. Vol. XVIII. No. 3. P. 23–31.
8. Thermal state of permafrost in Russia / V.E. Romanovsky, D.S. Drozdov, N.G. Oberman, G.V. Malkova, A.L. Kholodov, S.S. Marchenko, N.G. Moskalenko, D.O. Sergeev, N.G. Ukraintseva, A.A. Abramov, D.A. Gilichinsky, A.A. Vasiliev // Permafrost and Periglacial Processes. 2010. No. 21. P. 136–155.
9. 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. No. 17(6). С. 640–647.
10. Gismeteo: Погода в Воркуте сегодня [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://www.gismeteo.ru/weather-vorkuta (дата обращения: 20.10.2019).