

ИНЖЕНЕРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ ПОЛИГОНАЛЬНЫХ ЛАНДШАФТОВ В РАЙОНЕ УСТЬЯ РЕКИ ТАМБЕЙ (СЕВЕР ПОЛУОСТРОВА ЯМАЛ)

ENGINEERING-GEOLOGICAL AND GEOCHEMICAL CONDITIONS OF POLYGONAL LANDSCAPES IN THE AREA OF THE TAMBEY RIVER MOUTH (THE NORTH OF THE YAMAL PENINSULA)

ВАСИЛЬЧУК А.К.

Старший научный сотрудник географического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, д.г.н., г. Москва, alla-vasilch@yandex.ru

ВАСИЛЬЧУК Ю.К.

Профессор географического и геологического факультетов Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, д.г.-м.н., действительный член Российской академии естественных наук, г. Москва, vasilch@geol.msu.ru, vasilch_geo@mail.ru

VASIL'CHUK A.C.

Senior staff scientist of the Geography Faculty of Lomonosov Moscow State University, DSc (doctor of science in Geography), Moscow, alla-vasilch@yandex.ru

VASIL'CHUK YU.K.

Professor of the Geography and Geology Faculties of Lomonosov Moscow State University, DSc (doctor of science in Geology and Mineralogy), member of the Russian Academy of Natural Sciences, Moscow, vasilch@geol.msu.ru, vasilch_geo@mail.ru

Ключевые слова:

река Тамбей; полуостров Ямал; полигональные ландшафты; инженерно-геологические условия; геохимические условия; повторно-жильные льды; температура грунтов; пыльца; споры.

Key words:

Tambey River; Yamal Peninsula; engineering-geological conditions; geochemical conditions; polygonal landscapes; ice wedges; soil temperature; pollen; spores.

Аннотация

Рассмотрены факторы, определяющие инженерно-геологические аспекты освоения территорий, примыкающих с севера к Южно-Тамбейскому газоконденсатному месторождению на полуострове Ямал (в т.ч. широкое развитие неглубоко залегающих повторно-жильных льдов) на примере лицензионного участка месторождения в районе устья реки Тамбей. Охарактеризованы рельеф, климат, гидрологические условия, геохимические особенности донных отложений Обской губы, почвы, геокриологические условия, криогенные процессы и инженерно-геологические условия участка. Исследованы субфоссильные палиноспектры, содержание спор и пыльцы, химический состав ледяных жил и вмещающих их отложений, что позволило уточнить историю формирования ледяных клиньев. Особенно детально рассмотрен характер деформаций вмещающих пород на контакте с ледяными жилами. Рассчитаны значения макрольдистости пойменного массива на глубину 1 и 3 м и потенциальные осадки при протаивании жил и текстурных льдов. Сравнение результатов геотемпературных замеров по скважинам, выполненных в 1978 и 2013 гг., показало рост среднегодовых температур более чем на 5 °C за 35 лет.

Abstract

The paper deals with the factors determining engineering-geological aspects of development of the territories adjoining the South Tambe Gas-Condensate Field in the Yamal Peninsula (including widespread development of shallow location ice wedges) by the example of a licensed site of the field in the area of the Tambe River mouth. The relief, climate, hydrological conditions, geochemical features of bottom sediments of the Gulf of Ob, soils, geocryological conditions, cryogenic processes and engineering-geological conditions of the site are characterized. Subfossil pollen spectra, spore and pollen content, chemical composition of ice wedges and surrounding sediments are investigated, that permits to clarify the formation history of ice wedges. The character of enclosing soil deformations on the contacts with ice wedges is considered especially in detail. The macro ice content of the floodplain massif to the depths of 1 and 3 m and the potential subsidence at thawing of ice wedges are calculated. Comparison of the results of geothermal measurements in boreholes of 1978 and 2013 shows that the average annual temperature increased by more than 5 °C per 35 years.

Введение

К Тамбейской группе месторождений полуострова Ямал относятся Северо-Тамбейское, Западно-Тамбейское и Тасийское месторождения, которые находятся в непосредственной близости от создаваемой инфраструктуры крупнейшего Южно-Тамбейского ГКМ¹

и порта Сабетта, расположенного на северо-востоке полуострова Ямал в Ямало-Ненецком автономном округе. Запасы Тамбейской группы оцениваются в 1,56 трлн м³ природного газа (рис. 1).

Цель данной работы — уточнить характер залегания, макрольдистость и условия формирования голоценовых повторно-жильных льдов (ПЖЛ) в районе Южно-Там-

¹ ГКМ — газоконденсатное месторождение.

бейского и Северо-Тамбейского газоконденсатных месторождений (ГКМ) на северо-востоке Ямала (рис. 2), а также проанализировать возможные инженерно-геологические последствия частичного оттаивания многолетнемерзлых толщ и повторно-жильных льдов.

Зона влияния проекта строительства интегрированного комплекса по добыче и сжижению природного газа и газоконденсата «Ямал СПГ» включает территории, как непосредственно, так и косвенно затрагиваемые объектами проекта и ассоциированными объектами, расположенными в пределах территории горного отвода (рис. 3) и лицензионного участка (площадью соответственно 974 и 2031 км²).

Южно-Тамбейское газоконденсатное месторождение — это приоритетный национальный проект с потенциальным уровнем добычи 27 млрд м³ газа в год. Согласно генеральной схеме развития газовой отрасли России ввод месторождения в эксплуатацию намечен на 2024–2027 гг. На базе месторождения планируется строительство завода по производству сжиженного природного газа.

К настоящему времени на Южно-Тамбейском ГКМ выполнен комплекс геолого-разведочных работ, включающий сейсмические исследования, бурение разведочных скважин, создание геологической модели месторождения и подсчет его запасов.



Рис. 1. Расположение района исследований (показано красным квадратиком) в устье реки Тамбей и размещение Тамбейской группы газоконденсатных месторождений (показано на врезке в левом верхнем углу рисунка)

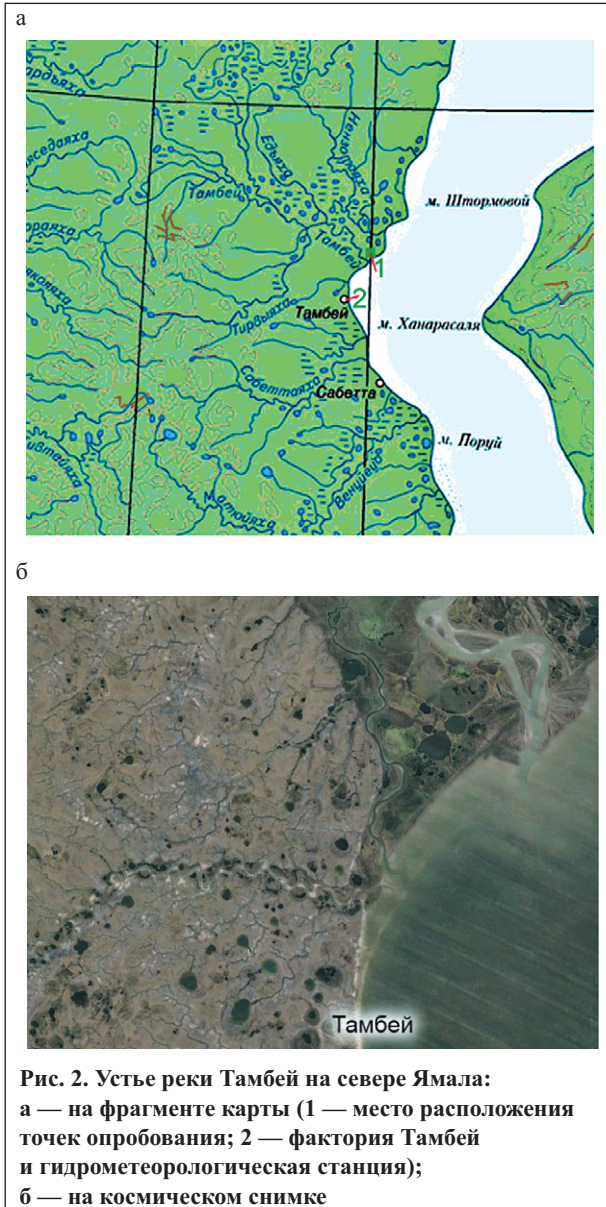


Рис. 2. Устье реки Тамбей на севере Ямала: а — на фрагменте карты (1 — место расположения точек опробования; 2 — фактория Тамбей и гидрометеорологическая станция); б — на космическом снимке



Рис. 3. Территория горного отвода (ограничена серой линией) и лицензионного участка (ограничена красной линией) проекта строительства интегрированного комплекса по добыче и сжижению природного газа и газоконденсата на севере полуострова Ямал (проекта «Ямал СПГ»)

Газ, добываемый на месторождении, планируется экспортировать на международный рынок. В 2013 году на нем началось эксплуатационное бурение.

Проекты разработки и обустройства месторождения предусматривают бурение около 200 скважин на 19 кустовых площадках, строительство газосборных сетей, мощностей по подготовке газа и завода по его сжижению. Завод будет состоять из трех технологических линий производительностью 5,5 млн т в год каждая, а также он будет включать емкости для хранения сжиженного природного газа (СПГ). Здесь построен один из самых крупных в мире северных международных аэропортов, который получил название Сабетта по названию расположенного поблизости поселка. На нем построена взлетно-посадочная полоса, производится строительство зданий и сооружений аэровокзального комплекса. Также стартовало строительство морского порта (тоже под названием Сабетта) для обеспечения круглогодичной навигации по Северному морскому пути, где уже начата эксплуатация грузовых причалов.

Первая линия по производству сжиженного газа (5,5 млн т в год) должна войти в строй в 2017 году. К этому времени порт Сабетта должен начать отгрузку углеводородного сырья. Площадка завода располагается на удалении 500–700 м от берега Обской губы.

ООО «Газпром геологоразведка» проводит на территории одной из самых северных метеостанций

и факторий Ямальского района — поселка Тамбей — уборку антропогенного мусора (рис. 4, а, б). На первом этапе экологического проекта было очищено 23 га тундры вблизи акватории Обской губы (рис. 4, в). Для вывоза с территории побережья и дальнейшей утилизации было собрано около 900 т брошенного металлолома, 800 т древесных отходов, 400 т бытового мусора. Территория поселка практически полностью рекультивирована (рис. 4, г).

На изучаемую территорию еще в XVII веке были созданы карты (рис. 5). Данные по ним обобщил Семен Ульянович Ремезов в своем уникальном труде [17]. На картах были обозначены названия того времени² [17]: земля Самоетская (Самоедская³) — ныне полуостров Ямал; море Акиян (море-океан) — Карское море; море Мангазейско (Мангазейское) — акватория Обской и Тазовской губ; р. Манзеля — р. Тамбей; губа Разбой — бухта Тамбей; р. Сопошна (Сопочная) — р. Сабетта; р. Подсопошна (Подсопочная) — р. Сеяха (Зеленая); губа Камена (Каменная) — бухта Каменная. «От Подсопошной через Обскую губу впрямь от земли до земли, через, не видать. А поперек парусом ровным, бегом часа с 4 или 5, невелико обход обоих краев и те насереде спускали шейму с якорем 40-ка сажень не стало. И с того места начнет земля появляться к Русскому завороту⁴ от Сопошной р. до заворотной через, в голоме плесом, день или сутки гребут», — описывал те края С.У. Ремезов.



Рис. 4. Скопление бочек из-под горючего и металлолома вблизи поселка Тамбей и в его окрестностях до начала экологических работ по очистке этой территории (а, б); ход очистки (в) и ее результат (г) (фото из фонда ООО «Газпром геологоразведка»)

² <http://www.yanaorgo.ru/karta/remezov/22.jpg>.

³ Самоеды (лопары) — устаревшее название народов, относящихся к самодийской ветви уральской языковой семьи, в том числе ненцев — коренного населения Ямала. Это слово произошло, вероятно, от саамского слова «самэ-едиэ» — «земля саамов», которое русские в ходе освоения Севера перенесли с саамов (лопарей) на ненцев и другие родственные им народы (ныне называемые в этнографической литературе самодийцами).

⁴ Русский заворот — устье Тазовской губы (мыс Трехбугорный — мыс Круглый).



Рис. 5. Лист из атласа 1699–1701 гг. «Хорографическая (чертежная) книга», составленная С.У. Ремезовым [17]. Изображение было спроецировано на своеобразную окружность, что позволило уместить в ограниченном квадрате листа изрезанную заливами и мысами обширную территорию полуострова Ямал (по <http://sibir79.livejournal.com/397228.html>)

Характеристика исследованных участков

Исследованные авторами участки распространения мощных голоценовых повторно-жильных льдов располагаются в пойме устьевой части реки Тамбей (71° 28' 30" с.ш., 71° 48' 50" в.д. на абсолютных высотах до 3–4 м. Одной из характерных литокриогенных особенностей изученных макроледяных клиновидных тел является значительная деформация льда и вмещающих отложений.

Рельеф

Поверхность устьевой части реки Тамбей равнинная. Среди геоморфологических уровней выделяются: русло, низкая пойма, высокая пойма, отмели, пляж, лайда. Местами встречаются обнажения высокой поймы высотой до 3 м.

Климат

Климат на изучаемой территории характеризуется особенно длительной холодной суровой зимой с сильными бурями и частыми метелями. Среднегодовая температура в поселке Тамбей — минус 10,3 °С (табл. 1). В год выпадает около 263 мм осадков. Самый засушливый месяц — март, когда сумма осадков не превышает 13 мм. Большая часть осадков выпадает в августе, в среднем составляя 43 мм. Разница между количеством осадков в самый сухой и в самый влажный месяц — 30 мм. Максимальная высота снежного покрова — 40 см. Самый теплый месяц года — август со средней температурой 6,8 °С (рис. 6), самый холодный — февраль со средней температурой минус 24,2 °С. Таким образом, амплитуда среднемесячных температур в течение года достигает 31 °С. Абсолют-

ный минимум температуры — минус 56 °С, абсолютный максимум — плюс 26 °С (см. табл. 1). Число пасмурных дней составляет 204, число дней со снежным покровом — 261, среднегодовое количество дней с метелями — 137.

Длительная зима, короткое прохладное лето (длительность периода со среднесуточной температурой выше 0 °С составляет 101 день), сильные ветры, незначительная мощность снежного покрова — все это способствует низким температурам грунтов.

Гидрологические условия

Длина реки Тамбей — 181 км. Ее водный режим характеризуется резким преобладанием стока половодья, который проходит в июне по промерзшей почве, короткой и низкой летне-осенней межени, прерываемой редкими паводками, и отсутствием стока в зимний период в результате перемерзания реки. Сток летне-осенней межени формируется за счет таяния многолетнемерзлых пород и редких дождей. Период стока длится всего около 3–4 месяцев в году [15, 19].

В притамбейской части Обской губы происходит сложное динамическое взаимодействие пресного стока с солеными водами Карского моря, здесь же активизируются физико-химические, биохимические и биологические процессы, происходящие на границе смены пресноводных биоценозов морскими. Устье Тамбея является разграничивающей точкой средней и северной частей Обской губы. Высота морских приливов здесь составляет 0,5–0,7 м. Продвижение на юг клина осолоненных вод в Обской губе испытывает значительные сезонные колебания — в среднем от 50 км при «большой» воде в июле до 300 км в конце зимней межени в апреле.

Таблица 1

Температуры воздуха и осадки на метеостанции «Тамбей» в 1966–1970 гг. (по В.Т. Трофимову и др. [16])						
Характеристика	Год					Среднее
	1966	1967	1968	1969	1970	
Среднегодовая и среднемноголетняя температура воздуха, °С	-12,2	-8,8	-12,3	-11,2	-11,8	-11,3
Амплитуда температур воздуха, °С	40,7	37,8	30,7	34,9	32,3	35,4
Среднемесячная температура самого холодного месяца, °С	-35,7	-31,0	-26,7	-29,7	-28,8	-30,8
Среднемесячная температура самого теплого месяца, °С	5,0	6,8	4,0	5,2	3,5	4,9
Годовая и среднемноголетняя сумма осадков, мм	437	462	910	306	219	467

Испарение с поверхности озера площадью 0,003 км², расположенного в пределах полигонального массива близ поселка Тамбей, составляет 167 мм в год, количество выпадающих на поверхность озера осадков — 450 мм, приток воды с площади водосбора — 230 мм, сток воды из озера — 513 мм [8, стр. 364].

Дата первого появления плавучего льда на поверхности Тамбея варьирует от 10 сентября до 14 октября, а дата устойчивого становления ледяного покрова — от 8 октября до 16 декабря [14].

Геохимические особенности донных отложений Обской губы

В период, свободный ото льда, гидрохимический режим Обской губы подвержен определяющему влиянию изменчивости синоптического масштаба [6]. Метеорологические условия контролируют распространение струй в Обской губе, определяют формирование гидрохимической структуры и развитие продукционных процессов в прибрежных мелководных областях Обской губы. Летом максимальному ветровому воздействию (преимущественно фиксируются ветры южных и юго-западных направлений) подвержены северное и западное побережья Обской губы. В июне — августе преобладают ветры, обеспечивающие сгоны, благоприятные для развития струйности потоков и приводящие к выраженной пространственной измен-

чивости гидрохимической структуры в губе. В октябре происходит перестройка атмосферных процессов на зимний режим (преобладают ветры северного и северо-восточного направлений), изменяется распределение ветровых нагрузок. Максимальные значения смещаются на северо-западную часть побережья Обской губы. В конце сентября — октябре доминируют сильные ветры, обуславливающие нагоны, препятствующие формированию струй. Ветры и штормы, периодическое действие которых характерно для рассматриваемых районов осенью, формируют локальные циркуляционные ячейки в Обской губе. Интенсивное перемешивание приводит к гомогенизации гидрохимического состава вод по вертикали практически по всей акватории губы [6].

Обследование донных отложений Обской губы проведено компанией ОАО «Ленморниипроект» в 2011 году. Результаты, представленные в техническом отчете Ленморниипроекта по инженерно-экологическому обследованию Обской губы, базируются на результатах анализа 281 пробы донных отложений. Каждая проба была проанализирована на содержание тяжелых металлов (As, Cd, Cu, Cr, Hg, Mn, Ni, Pb, Zn), нефтепродуктов, полихлорированных бифенилов (ПХБ 28, ПХБ 52, ПХБ 101, ПХБ 138, ПХБ 153, ПХБ 180), пестицидов (ДДТ, ДДЕ, линдина g-ГХЦГ, линдина a-ГХЦГ) и ключевого полициклического ароматического углеводорода бенз(а)пирена. Результаты анализов показывают, что содержание полихлорированных бифенилов (ПХБ), пестицидов и бенз(а)пирена во всех пробах оказалось ниже предела обнаружения соответствующего аналитического метода (0,0001 мг/кг — для ПХБ; 0,01 мг/кг — для пестицидов; 0,004 мг/кг — для бенз(а)пирена). Содержание нефтепродуктов в донных отложениях находилось между порогом обнаружения (5 мг/кг) и 100 мг/кг или чуть более (последняя величина была отмечена только в двух пробах). Концентрации тяжелых металлов в пробах невысоки (As — 0,1–2,6 мг/кг; Cd — меньше предела обнаружения (0,05 мг/кг); Cu — 1–20 мг/кг; Ni — 1–36 мг/кг; Pb — 1–280 мг/кг; Zn — 2–74 мг/кг).

Обская вода относится к гидрокарбонатному типу с преобладанием ионов кальция и магния, характеризуется высоким содержанием растворенных органических веществ, растворенных минеральных и органических соединений азота и фосфора, большим содер-

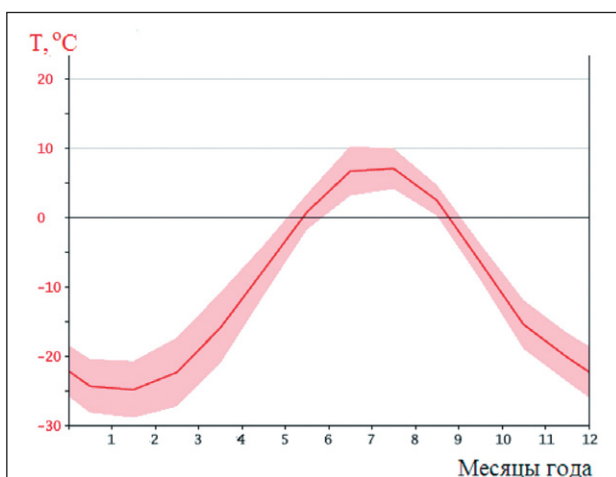


Рис. 6. Годовой ход температуры воздуха (Т) на метеостанции «Тамбей»

жанием коллоидной фракции органических веществ. Содержание растворенного органического углерода снижается в мористом направлении. Обская губа характеризуется высокой для шельфовой зоны Арктики биологической активностью с максимальной биопродуктивностью в пресноводных частях [6].

В зоне смешения пресных и соленых вод содержание биомассы фитопланктона резко снижается, несмотря на достаточно высокое содержание биогенных веществ. Максимальное развитие водорослей в этой зоне отмечается несколько южнее места смешивания пресных и соленых вод в районе поселка Сеяха. Далее на север до мыса Тамбей содержание биомассы снижается до сотых долей миллиграмма на килограмм, а в районе мыса Дровяного — до тысячных долей. Связано это с увеличением солености вод, при котором пресноводный фитопланктон погибает, а развитие солоноватоводных форм лимитируется низкой температурой воды и высокой численностью солоноватоводного зоопланктона. В летний период южной границей распространения морского зообентоса является район мысов Тамбей и Дровяной. В зимнее время она может существенно сдвигаться на юг, доходя в отдельные годы до мыса Трехбугорный [13].

В реку Тамбей в небольшом количестве заходят на нерест омуль, чир, сиг и ряпушка. Нерестилища расположены на протяжении первых 40 км вверх по течению от устья Тамбея [13].

Растительность

Участок в низовьях реки Тамбей расположен в подзоне арктических тундр. Растительность представлена различными видами лишайников [1], мха, тундровых трав, местами — стелющейся карликовой ивой. Распространены осоково-гипновые полигональные болота на торфяно-глеевых почвах.

Проведенные исследования субфоссильных палиноспектров показали, что в них доминирует пыльца осок, которая составляет около 5,2–16,8%, а также злаков (3,5–12%), отражая преобладание этих семейств в растительном покрове. Пыльца остальных встречающихся в растительном покрове семейств отмечается, как правило, единично, часто не соответствуя их роли в растительных сообществах. Для субфоссильных спектров характерно сравнительно высокое содержание заносной пыльцы сосны обыкновенной (до 8–9%) и сосны сибирской (кедра сибирского) (до 10–12%). Содержание пыльцы ели в большинстве изученных образцов составило менее 2%, карликовой березы — до 18%, ольховника (дюшекии) не более 5% [3, 5].

Почвы

Согласно почвенно-географическому районированию страны [9] на севере Ямала выделяют следующие типы почв: тундровые перегнойно-глеевые мерзлотные, тундровые перегнойно-глеевые мерзлотные иллювиально-гумусовые, тундровые торфянисто-глеевые мерзлотные, тундровые торфянисто-глеевые подзолистые, торфяно-болотные мерзлотные, торфяно-болотные деградированные, иллювиально-болотные иловато-торфяные, мерзлотные иллювиальные.

В соответствии с классификацией почв 2004 г. [18] в этом районе распространены следующие типы почв:

подбуры, подбуры глеевые, криоземы, криоземы грубогумусные, торфяно-криоземы, глееземы, торфяно-глееземы, иллювиальные слоистые, иллювиальные перегнойно-глеевые, иллювиальные торфяно-глеевые, иллювиальные серогумусовые, торфяные олиготрофные, торфяные олиготрофные глеевые, торфяные эу-трофные глеевые, псаммоземы. На территориях посел-

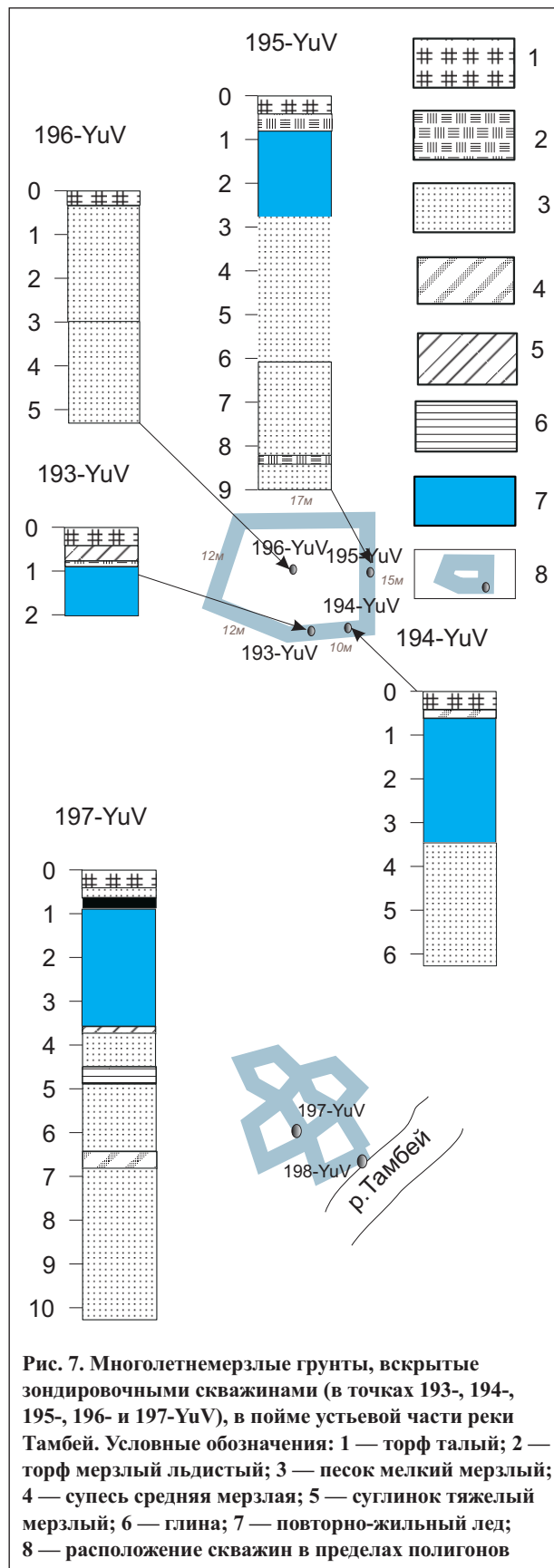


Рис. 7. Многолетнемерзлые грунты, вскрытые зондировочными скважинами (в точках 193-, 194-, 195-, 196- и 197-YuV), в пойме устьевой части реки Тамбей. Условные обозначения: 1 — торф талый; 2 — торф мерзлый льдистый; 3 — песок мелкий мерзлый; 4 — супесь средняя мерзлая; 5 — суглинок тяжелый мерзлый; 6 — глина; 7 — повторно-жильный лед; 8 — расположение скважин в пределах полигонов



ков Тамбей и Сабетта и других объектов инфраструктуры (унаследованных площадок скважин, порта, складов горюче-смазочных материалов и т.д.) встречаются антропогенно-преобразованные почвы.

Криогенные ландшафты

Преобладающие ландшафты в пойме устьевой части реки Тамбей — полигональные тундровые. Полигоны, как правило, валиковые вогнутые, реже выпуклые.

Геокриологические особенности исследованных участков

Мощность многолетнемерзлых пород (ММП) на исследованных участках в среднем составляет 50 м в пойме и до 70–100 м в ее тыловых частях. Бурение и замеры температур проводились авторами в пойме устьевой части реки Тамбей в рамках выполнения работ Тюменской инженерно-геологической экспедиции геологического факультета МГУ.

В пределах высокой поймы в устье Тамбея в 2 км севернее озера Харато было пробурено несколько скважин по створу от центра полигона до канавки и ряд зондировочных скважин далее по жиле для выявления ее боковых контактов и конфигурации ледяного клина (рис. 7).

В скважине, заложенной в центре полигональной канавки на поверхности поймы (в точке 193-YuV), сверху вниз были вскрыты:

- 0–0,43 м — талый шоколадно-коричневый сфагновый торф, к низу сильно опесчаненный и суглинистый;
- 0,43–0,70 м — темно-бурый тяжелый оторфованный и опесчаненный суглинок со среднешлировой среднеслоистой криотекстурой, льдистостью 30% и горизонтальным расположением шпиров;
- 0,70–0,90 м — бурый сильнольдистый торф с базальной криотекстурой и льдистостью 50%;
- 0,90–2,00 м — вертикально-слоистый лед с включениями песка и торфа, с мощностью прослоев чистого льда 5 см и со снижением содержания минеральных примесей на глубине 1,50 м.

Таблица 2

Температура мерзлых грунтов, °С, в разрезе поймы устьевой части реки Тамбей									
Глубина, м	Пойма реки Тамбей							Лайда близ поселка Сабетта	
	Номер скважины								
	194-YuV	195-YuV		196-YuV		197-YuV		4	5
	Дата измерения								
	12.08.1978	14.08.1978	16.08.1978	15.08.1978	16.08.1978	20.08.1978	21.08.1978	30.03.2013	29.04.2012
0,0	4,0	2,8	2,8	3,0	3,6	2,2	1,1	-	-
0,5	-	-0,4	-0,4	-	-	-	-	-	-
1,0	-1,0	-	-	-0,8	-0,6	-0,8	-0,8	-5,2	-6,1
1,5	-	-1,4	-1,4	-	-	-	-	-	-
2,0	-2,8	-	-	-3,2	-3,0	-3,0	-2,9	-3,3	-5,8
2,5	-	-4,4	-4,6	-	-	-	-	-	-
3,0	-4,2	-	-	-4,6	-4,6	-4,6	-4,6	-1,6	-4,9
3,5	-	-5,8	-5,8	-	-	-	-	-	-
4,0	-5,4	-	-	-5,9	-5,7	-6,0	-6,0	-1,2	-4,1
4,5	-	-6,8	-6,9	-	-	-	-	-	-
5,0	-6,6	-	-	-6,8	-6,8	-7,0	-6,9	-1,8	-3,6
5,5	-	-7,0	-7,3	-	-	-	-	-	-
6,0	-	-	-	-	-	-7,4	-7,4	-2,1	-3,2
6,5	-	-7,6	-7,8	-	-	-	-	-	-
7,0	-	-	-	-	-	-7,8	-7,7	-2,3	-3,5
7,5	-	-8,0	-8,0	-	-	-	-	-	-
8,0	-	-	-	-	-	-7,8	-7,7	-2,3	-3,8
8,5	-	-8,1	-8,0	-	-	-	-	-	-
9,0	-	-	-	-	-	-7,8	-7,7	-2,6	-4,1
10,0	-	-	-	-	-	-7,6	-7,6	-2,8	-4,2



В скважине, заложенной в центре полигональной канавки на поверхности поймы (в точке 194-YuV), сверху вниз были вскрыты:

- 0–0,43 м — талый шоколадно-коричневый осоково-пушицевый торф, книзу с супесью;
- 0,43–0,60 м — темно-бурая оторфованная супесь с базальной частослоистой криотекстурой и льдистостью более 60%;
- 0,60–3,50 м — вертикально-слоистый лед с включениями песка и торфа и мощностью прослоев чистого льда 5 см, со снижением содержания минеральных примесей на глубине 1,50 м, где лед становится рыхлым и матовым из-за пузырьков воздуха;
- 3,50–6,15 м — горизонтально-слоистый серо-желтый мелкий песок с массивной криотекстурой и льдистостью 10%, на глубине 4,80 м — с углистыми примазками и тонкими прослоями, в интервалах 5,10–5,20 и 5,40–5,80 м — с тонкими (0,5 см) прослоями торфа.

В скважине, заложенной в центре полигональной канавки на поверхности поймы (в точке 195-YuV), сверху вниз были вскрыты:

- 0–0,50 м — талый шоколадно-коричневый осоково-пушицевый торф, книзу сильно опесчаненный;
- 0,50–0,70 м — мерзлый слоистый коричневый опесчаненный торф (с опесчаненными светлыми прослоями мощностью 3–4 см) с микрошлировой частослоистой криотекстурой и льдистостью 30%;
- 0,70–0,85 м — сильнольдистый серый мелкий песок со среднешлировой средне- и частослоистой криотекстурой;
- 0,85–2,80 м — вертикально-слоистый лед с включениями песка и торфа (с мощностью прослоев чистого льда 5 см) со снижением содержания минеральных примесей на глубине 1,50 м, с повышением содержания пузырьков воздуха в интервале 1,80–2,00 м;
- 2,80–6,10 м — горизонтально-слоистый серо-желтый мелкий песок с массивной криотекстурой, льдистостью 5%, на глубине 4,80 м — с углистыми примазками и тонкими прослоями, в интервале 4,80–5,20 м — с тонкими (0,5 см) прослоями торфа, на глубине 6,00 м — с прослоем торфа мощностью 2 см;
- 6,10–8,20 м — неслоистый серый средний песок с массивной криотекстурой и льдистостью 5%;
- 8,20–8,30 м — темно-коричневый хорошо разложившийся торф с массивной криотекстурой и льдистостью менее 5%;
- 8,30–8,80 м — неслоистый серый средний песок с массивной криотекстурой и льдистостью 5%, в интервале 8,55 м — с прослоем темно-коричневого хорошо разложившегося торфа.

В скважине, заложенной в центре полигона на поверхности поймы (в точке 196-YuV), сверху вниз были вскрыты:

- 0–0,38 м — слой сезонного протаивания, представленный моховой подушкой, образованной сфагновым мхом, слоем коричневого торфа (15 см) и серым мелким оторфованным песком;
- 0,38–3,00 м — серый мелкий песок (в интервале 0,38–0,70 м — с микрошлировой среднеслоистой криотекстурой и льдистостью 15%, с глубины

0,70 м — с тонкошлировой частосетчатой криотекстурой и льдистостью 25–30%);

- 3,00–5,30 м — косослоистый серый мелкий песок с прослоями темно-серого и желто-серого песка мощностью по 0,3 см, с массивной криотекстурой и льдистостью 10%, на глубине 4,40 и 4,80 м — с прослоями хорошо разложившегося темно-коричневого торфа мощностью по 1–3 см.

В скважине, заложенной в центре полигональной канавки на поверхности поймы (в точке 197-YuV), сверху вниз были вскрыты:

- 0–0,35 м — талый плохо разложившийся коричневый торф;
- 0,35–0,60 м — мерзлый серый песок с пятнами и прослоями торфа, с неполносетчатой криотекстурой и двумя вертикальными шлирами льда толщиной по 1 см;
- 0,60–0,85 м — слоистый лед, сильно загрязненный минеральными примесями, с мощностью минеральных прослоев 0,5 см;
- 0,85–3,60 м — повторно-жильный коричневатый оторфованный лед с возрастающим с глубиной содержанием пузырьков воздуха, со снижающимся содержанием минеральных включений до глубины 2,4 м (окраска льда с глубиной становится более светлой, а начиная с 1,35 м она становится молочно-белой), с повышением содержания минеральных включений на глубине 2,4 м;
- 3,60–3,80 м — контакт плотного прозрачного льда и серо-коричневого слабооторфованного суглинка с массивной криотекстурой и льдистостью 10%;
- 3,80–4,50 м — желто-серый мелкий песок с частослоистой тонкошлировой криотекстурой и льдистостью 10%;
- 4,50–4,90 м — слоистая черная глина средней фракции со слабым запахом сероводорода, массивной криотекстурой и льдистостью 5%;
- 4,90–6,40 м — желто-серый мелкий песок с редко-слоистой микрошлировой криотекстурой и льдистостью 5%, с вертикальными шлирами льда мощностью по 0,5 см на глубине 5,10 м;
- 6,40–6,70 м — черная легкая сильно заиленная супесь с массивной криотекстурой и льдистостью 5%;
- 6,70–10,20 м — серый мелкий песок с частослоистой тонкошлировой криотекстурой и льдистостью 10%, с прослоем черной супеси средней фракции на глубине 8,7 м.

В августе 1978 г. авторами были измерены температуры мерзлых грунтов в скважинах, пробуренных в пойме реки Тамбей (табл. 2), и было выполнено их сравнение с температурами в скважинах, пробуренных в 2013 г. на лайде Обской губы близ поселка Сабетта. Это сравнение показало весьма заметный рост среднегодовых температур за 35 лет, составивший более 5 °C (рис. 8).

Также было выполнено определение свойств грунтов из скважины 196-YuV, пробуренной в пойме Тамбей (табл. 3).

Повторно-жильные льды

Повторно-жильные льды были исследованы в пределах обширного плоского участка поймы реки Тамбей, расположенного в 15 км северо-восточнее поселка Тамбей.

На поверхности поймы развит полигонально-ва-
ликовый рельеф с размерами полигонов от 10×10
до 30×40 м.

Разрез верхней части толщ поймы следующий. На
глубине 3,25 м от поверхности залегает песок русловой
фации. Он перекрыт слоистой пачкой песков фации
приречной поймы (мощностью 0,3 м). Выше залегают
пески лагунно-морской фации мощностью 1,6 м, пере-
крытые супесью пойменной фации (0,15 м). Венчают
разрез аллювиальный песок (0,1 м) и торф (0,1 м). Пе-
сок, залегающий в основании разреза, светло-серого
цвета, косослоистый, среднезернистый, с включениями
мелких частичек угля и аллохтонного торфа. Криоген-
ная текстура песка массивная, объемная льдистость со-
ставляет 10–20%. Очевидно, песок откладывался в на-
чальную стадию аккумуляции аллювия. Приустьевое
положение участка приводило к осолонению вод реки,
что повлекло к отложению сравнительно сильно мине-
рализованных русловых осадков.

В обнажении поймы прослежена система ледяных
жил (рис. 9). Их количество достигает 5–6 на каждые
85–100 м.

Морфологически выделяется два типа жил. Жилы
первого типа характеризуются резкими деформация-
ми вмещающей породы на контактах (рис. 10, а, б).
Хвосты жил уходят под современный урез реки Там-
бей (рис. 11). Жилы имеют различную ширину
в верхней части — от 0,34 до 2,5 м. Особенно отчет-
ливо деформации прослеживаются по характеру го-
ризонта слоистого песка, описанного выше для ин-

тервала 1,95–2,25 м. Этот горизонт вблизи жил уже
на расстоянии 0,5–1,0 м изгибается вверх, около жи-
лы принимая субвертикальное положение. А около
крупных жил он языкообразно «вдавливается» под
боковой контакт (см. рис. 9, а). На уровне голов жил
наблюдается перегиб слоев в сторону их (жил) осе-
вых швов. Они образуют два «козырька» над головой
жилы. Длина этих «козырьков» достигает 0,7–1,0 м.
Отметим, что на глубине 2,0 м расстояние между вер-
тикально расположенными по обе стороны от жил го-
ризонтами в некоторых случаях составляет 0,2–0,3 м,
а суммарная толщина слоев, простирающихся вверх
по обеим сторонам от жил, достигает 3,0–3,5 м. Если
мысленно разогнуть слои, то образуется перекрытие
слоев на 2,8–3,3 м.

Жилы второго типа — без деформаций вмещаю-
щей породы на контакте. Они имеют меньшую ши-
рину в верхней части — от 0,70–0,80 до 0,20–0,35 м
(см. рис. 8, в, з).

Гидрохимический и палинологический состав повторно-жильных льдов и вмещающих отложений

Авторами было выполнено определение химическо-
го состава пойменных отложений, вмещающих по-
вторно-жильные льды (табл. 4), и самого жильного
льда (табл. 5). Также были проанализированы споро-
во-пыльцевые остатки в пойменных отложениях
(табл. 6) и в самих жильных льдах (табл. 7, рис. 12).

Содержание водорастворимых солей во вмещаю-
щих повторно-жильные льды отложениях (см. табл. 4)
колеблется от 0,347 до 0,308%, в среднем составляя
0,257%. Преобладают ионы хлора и натрия, что ти-
пично для прибрежных районов. Соотношение содер-
жания ионов хлора и сульфат-ионов показывает, что
разрез по этому показателю можно разделить на две
части — нижнюю (5,5–8,6 м), в которой этот показа-
тель колеблется от 0,75 до 2,9, и верхнюю (0,6–4,4 м),
в которой он варьирует от 5,11 до 7,56. То есть состав
водорастворимых солей в верхней пачке песков сви-
детельствует о частых нагонных явлениях или о по-
вышении уровня Обской губы и поступлении солоно-
ватых вод в приустьевые участки реки.

Оценивая соотношение анионов хлора и сульфат-
ионов в повторно-жильных льдах, отметим, что значе-
ние этого показателя превышает 5 в интервалах 0,82–
1,06, 1,07–1,20, 1,50–2,00, 2,10–2,30 и 2,50–2,70 м, что
связано с накоплением льдов в режиме подтопления
водами Обской губы.

Спорово-пыльцевые спектры песка (см. табл. 5) со-
держат большое количество пыльцы древесных пород
(до 60%⁵) с преобладанием пыльцы кедра (до 30%)
и ели (до 25–28%). Велико содержание пыльцы карли-
ковой березы — до 30%. Такие палиноспектры нети-
пичны для отложений высокой поймы рек Восточного
Ямала. Это позволяет предположить существование
в соответствующие периоды времени частых нагонных
явлений (исходя из повышенного содержания солей,
преобладания ионов хлора и натрия и преобладания
пыльцы сосны и ели, которая переносится и по воздуху,
и по воде). Высокое содержание пыльцы древесных по-

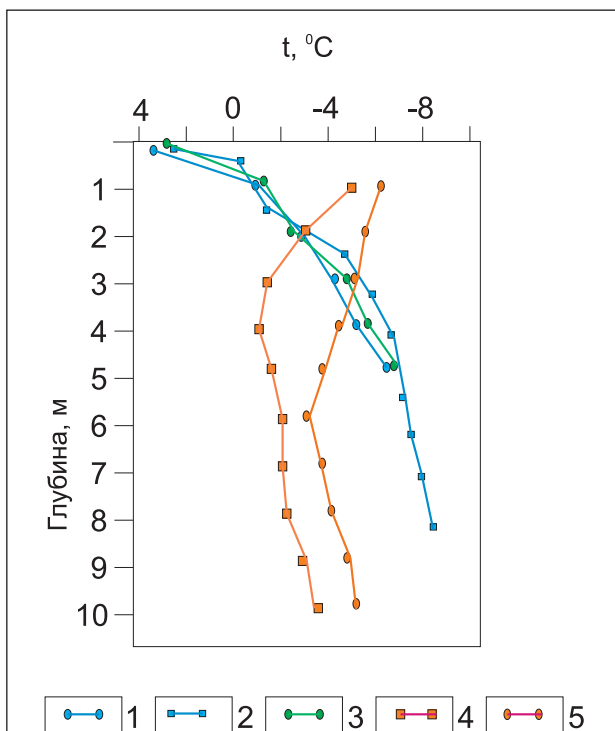


Рис. 8. Сравнение температур мерзлых грунтов
в разрезе поймы устьевой части реки Тамбей по
результатам измерений на различной глубине
в скважинах. Условные обозначения: 1–3 — скважины,
пробуренные авторами в 1978 г.: 1 — 194-YuV, 2 —
195-YuV, 3 — 196-YuV; 4, 5 — скважины № 4 и 5
соответственно, пробуренные в 2013 г. в пределах
лайды близ поселка Сабетта

⁵ Здесь и ниже содержание пыльцы отдельных компонентов
спектра приводится в процентах от ее общего количества.

Таблица 3

Свойства мерзлых грунтов из скважины 196-YuV, пробуренной авторами в 1978 г. в пойме реки Тамбей				
Грунт	Глубина, м	Влажность, %	Плотность, г/см ³	
			мерзлого грунта	скелета грунта
Песок	1	22,9	1,62	1,30
Песок	3	28,0	1,82	1,42
Песок	5	23,1	1,70	1,39

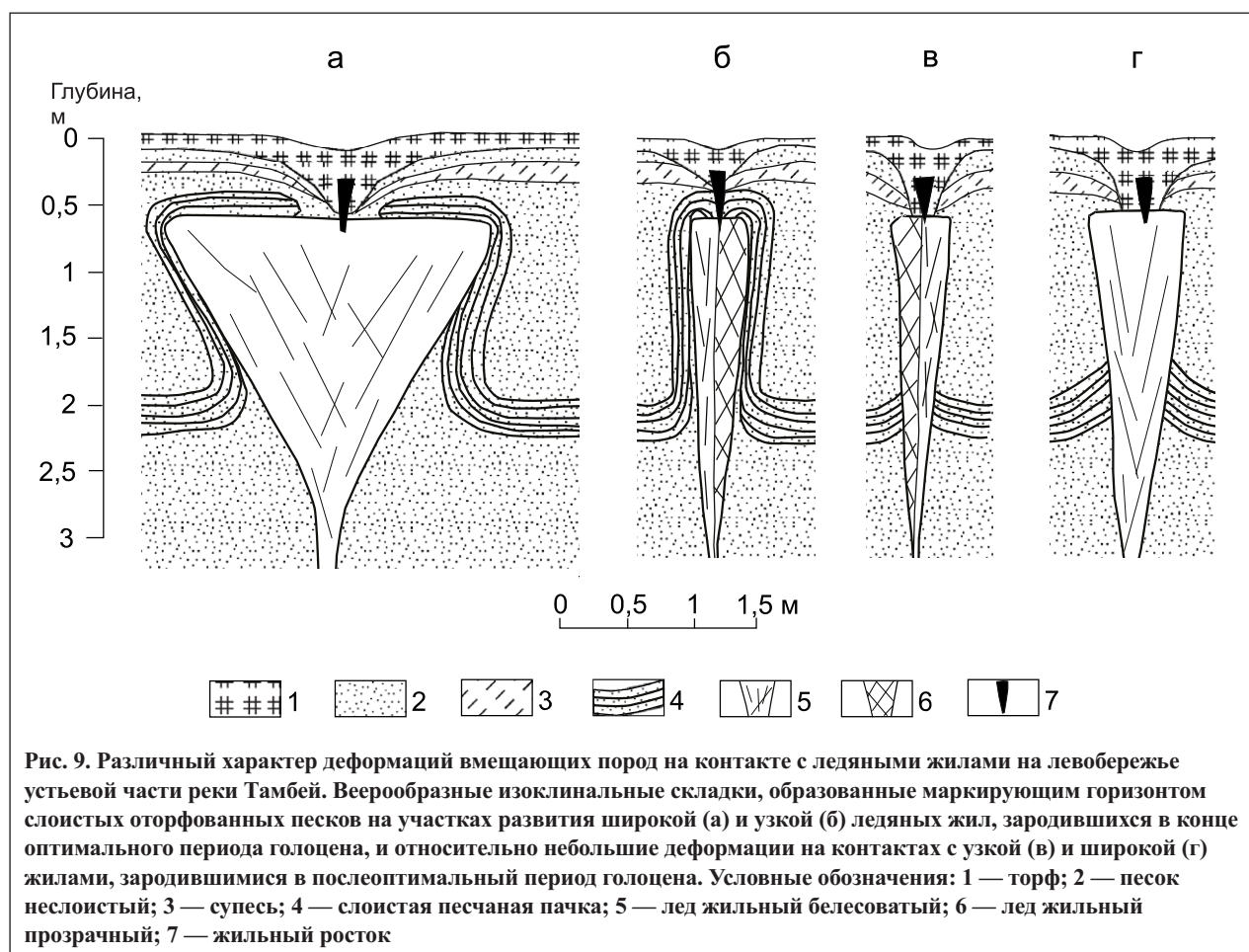
род позволяет отнести формирование отложений нижней части разреза поймы к оптимуму голоцена.

Слоистая пачка песка, залегающая в интервале 2,25–1,95 м, характеризуется высокой объемной льдистостью — до 60% в верхней части горизонта. Наличие в слоистых песках прослоев торфа и относительно небольшое содержание водорастворимых солей (менее 0,1%) свидетельствует о том, что они откладывались в приречной зоне поймы в условиях прирусловой отмели. Спорово-пыльцевые спектры (см. табл. 6) характеризуются содержанием пыльцы древесных пород до 70% с преобладанием пыльцы березы (38–42%) и высоким содержанием пыльцы ели (до 18%).

Пачка аллювия в интервале 1,96–0,35 м, представленная светло-серым мелкозернистым песком с прослоями аллохтонного торфа, характеризуется высокой

льдистостью (до 50%). Спорово-пыльцевые спектры — типично тундрового типа, характеризуются преобладанием пыльцы кустарничков и трав (до 58%). Литологические особенности горизонта и высокое содержание водорастворимых солей (до 0,22%), позволяют предположить, что седиментация отложений происходила в заливе, образовавшемся в результате ингрессии вод губы в дельту реки Тамбей. Это привело к значительному осолонению вод и повышенному содержанию водорастворимых солей в осадках.

Венчают разрез прослой светло-серого оторфованного песка мощностью 0,1 м и торфа мощностью 0,1 м. Содержание в них пыльцы древесных пород превышает 40–45%. При этом преобладает пыльца кедра (до 40%) и отмечено повышенное содержание пыльцы карликовой березы (до 30%) (см. табл. 6). Это



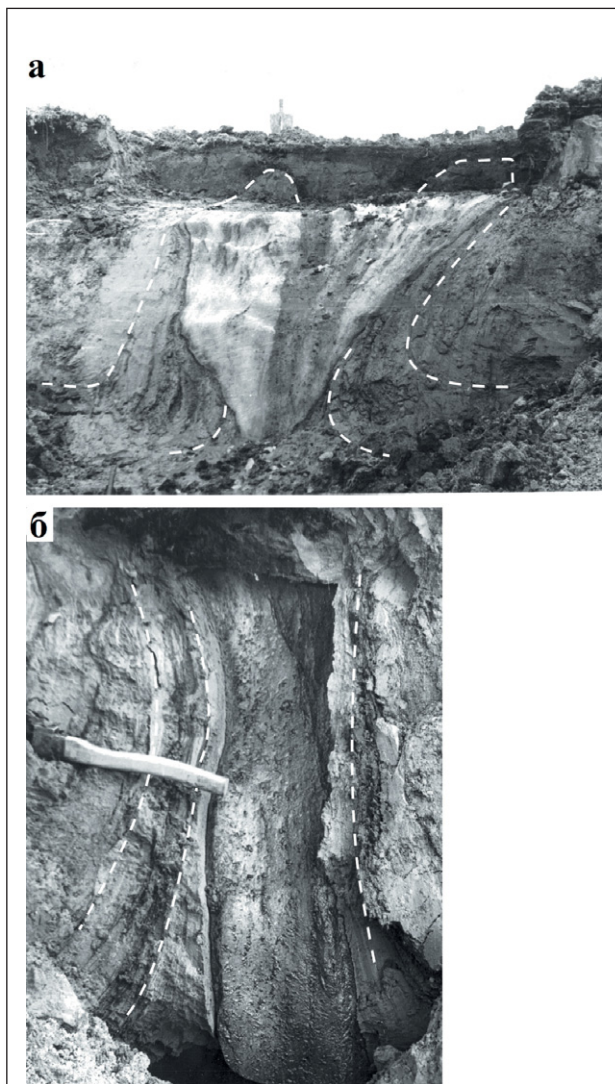


Рис. 10. Широкие (а) и узкие (б) голоценовые повторно-жильные льды с веерообразными изоклинальными складками на контактах, образованные маркирующим горизонтом слоистых оторфованных песков на участке поймы на левобережье устьевой части реки Тамбей, расположенном в 15 км северо-восточнее поселка Тамбей. (фото Ю.К. Васильчука)

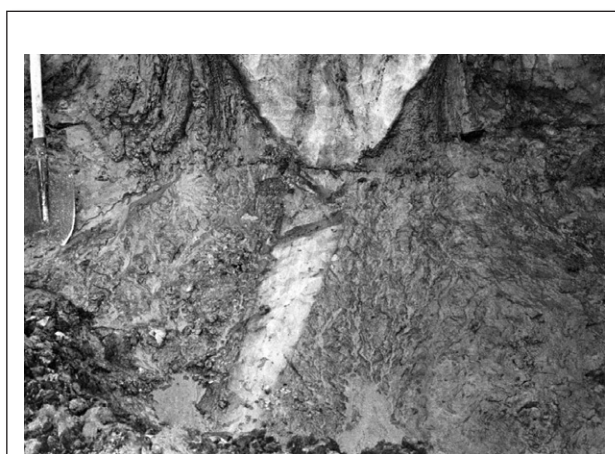


Рис. 11. Узкий хвост в нижней части широкой жилы с деформациями вмещающих пород на контакте в нижнем фрагменте толщи поймы устьевой части реки Тамбей. Верхняя часть хвоста жилы находится на меженном уровне реки (фото Ю.К. Васильчука)

свидетельствует о повышенной континентальности климата этого периода и о благоприятных условиях для морозобойного растрескивания и повторно-жильного льдообразования.

Верхний горизонт торфа формировался в течение последних 0,9 тыс. лет. Спорово-пыльцевой спектр его близок к современному, преобладает пыльца кустарников и трав (более 40%) — в основном осок и разнотравья.

Авторами был выполнен химический и спорово-пыльцевой анализ льда как широких, так и узких ледяных жил, вскрытых в толще пойменных отложений.

Во льду наиболее широкой ледяной жилы (см. рис. 11) содержание пыльцы древесных пород очень высокое — от 48 до 72%. Наблюдается и смена доминантов: при сравнительно низком содержании пыльцы древесных пород доминирует береза, при высоком — ель. Это свидетельствует о непрерывном формировании жилы в различных ландшафтно-фациальных условиях. Невысокое содержание водорастворимых солей (0,005–0,007‰) и их хлоридно-гидрокарбонатно-натриевый состав указывают на преимущественно субаэральный режим формирования жилы и преобладание в ее теле вод атмосферного происхождения.

Строение узкой жилы двучленное. В правой половине жилы лед прозрачный, с обилием органического материала, в левой — молочно-белый, с отчетливо выраженной вертикальной слоистостью за счет элементарных жилок. Прозрачный лед характеризуется повышенным содержанием водорастворимых солей (до 0,013‰) гидрокарбонатно-хлоридного состава с высоким (максимальным для всего комплекса) содержанием магния. Это позволяет сделать вывод о преимущественно субаквальном режиме формирования правой части жилы. А структурно-текстурные особенности льда говорят о его значительном метаморфизме, очевидно обусловленном длительностью существования этой части льда. Молочно-белый лед в левой половине отличается меньшим содержанием водорастворимых солей (не более 0,008‰), что, вероятнее всего, указывает на преимущественно субаэральный режим формирования льда. Высокое содержание пыльцы древесных пород (62–70%) и ее качественный состав позволяют говорить о формировании этой части жилы во второй половине оптимума голоцена.

В строении узкой ледяной жилы без деформаций вмещающих пород на контакте наблюдается много общего с узкой жилой, описанной выше. Здесь также наблюдаются две вертикальные зоны, сложенные различным по структуре и текстуре льдом. Однако, если молочно-белый лед с малым содержанием водорастворимых солей (0,006–0,008‰) обнаруживает полное сходство с вышеописанным, то прозрачный более засоленный лед (0,014‰) имеет вертикально-слоистую текстуру и элементарные жилы в нем можно выделить визуально. Это, вероятно, свидетельствует о меньшей длительности метаморфизации прозрачного льда этой жилы. Более широкий клин без деформаций вмещающей породы на контакте отличается малым содержанием водорастворимых солей (40–68 мг/л), хлоридно-натриевым их составом, малым содержанием гидрокарбонатов. Можно предположить, что формирование жилы шло преимущественно в субаэральном режиме в усло-

виях высокой поймы. Различия в составе спорово-пыльцевых комплексов в образцах из жилы (содержание пыльцы древесных пород изменяется от 38 до 90% от общего количества пыльцы) свидетельствует о ее непрерывном росте с момента ее формирования.

Авторами было изучено еще около 10 жил в обнажении. Кроме того, было разбурено 3 жилы. Результаты их анализа обнаруживают те же закономерности, что и для вышеописанных. Наиболее узкие жилы характеризуются наличием вертикальных зон прозрачного льда с повышенным содержанием водорастворимых солей (до 0,035‰). Широкие жилы и слабометаморфизованные части узких жил содержат от 0,004 до 0,009‰ водорастворимых солей.

Макрольдистость мерзлых толщ и вероятные последствия протаивания повторно-жильного льда в пойменной толще устьевой части реки Тамбей

Ранее Ю.К. Васильчуком [4] был предложен новый подход для расчета объема макрольдистости ограниченного со всех сторон ледяными жилами единичного массива за счет повторно-жильных льдов. Этот подход основан на вычислении разности объемов прямоугольного параллелепипеда (т.е. всего массива, включающего и лед, и грунт) и усеченной пирамиды (т.е. объема грунта внутри этого массива).

В наиболее общем случае единичным объемом прямоугольного полигона является прямой параллелепипед, т.е. призма, основанием которой служит параллелограмм (в случае четырехугольного полигона это, как правило, прямоугольник). Объем прямоугольного параллелепипеда (V_1) вычисляется по формуле:

$$V_1 = H_1 \times S, \quad (1)$$

где H_1 — высота прямоугольного параллелепипеда; S — площадь основания прямоугольного параллелепипеда (вычисляемая как произведение его сторон).

Как известно, объем усеченной пирамиды (V_2) вычисляется по формуле:

$$V_2 = \frac{1}{3} H (S_1 + \sqrt{S_1 S_2} + S_2), \quad (2)$$

где H_2 — высота усеченной пирамиды; S_1, S_2 — площади ее оснований.

Разница между объемами V_1 и V_2 даст объем повторно-жильного льда в элементарном блоке, а процентное отношение объема льда к общему объему блока даст величину макрольдистости. Таким образом, для расчета макрольдистости по этой методике достаточно знать ширину и высоту ледяных жил в пределах выделенного элементарного блока [4]. Макрольдистость авторы рассчитали для верхних 1 и 3 м (табл. 8) без учета мощности сезонно-талого слоя.

Жилы первого типа (широкие) имеют ширину в верхней части 2,5 и 2,0 м. Жилы второго типа (без деформаций вмещающей породы на контакте) имеют меньшую ширину в верхней части — от 0,8–2,0 м до 0,20–0,35 м (в среднем примем 1,0 м). Мощность (высоту) и тех, и других жил примем равной 3 м. Размеры полигональной решетки в пойме реки Тамбей меняются при приближении к реке: размеры полигонов на расстоянии более 100 м от реки составляют около 50×70 м, на расстоянии 100–20 м — 15÷17×25÷30 м, а на расстоянии менее 20 м — около 7×10 м.

Таким образом, льдистость отложений за счет ПЖЛ очень велика, особенно при частой сетке полигонов. Ее максимальное значение составляет 30,7% и наблюдается для полигонов размером 7×10 м, в то время как полигоны размером 50×70 м и более характеризуются низкими значениями макрольдистости — около 2% (см. табл. 8).

Просадка при растеплении даже на глубину 2 м массива с широкими ледяными жилами (повторно-жильными льдами) может составить около 1 м только за счет их протаивания.

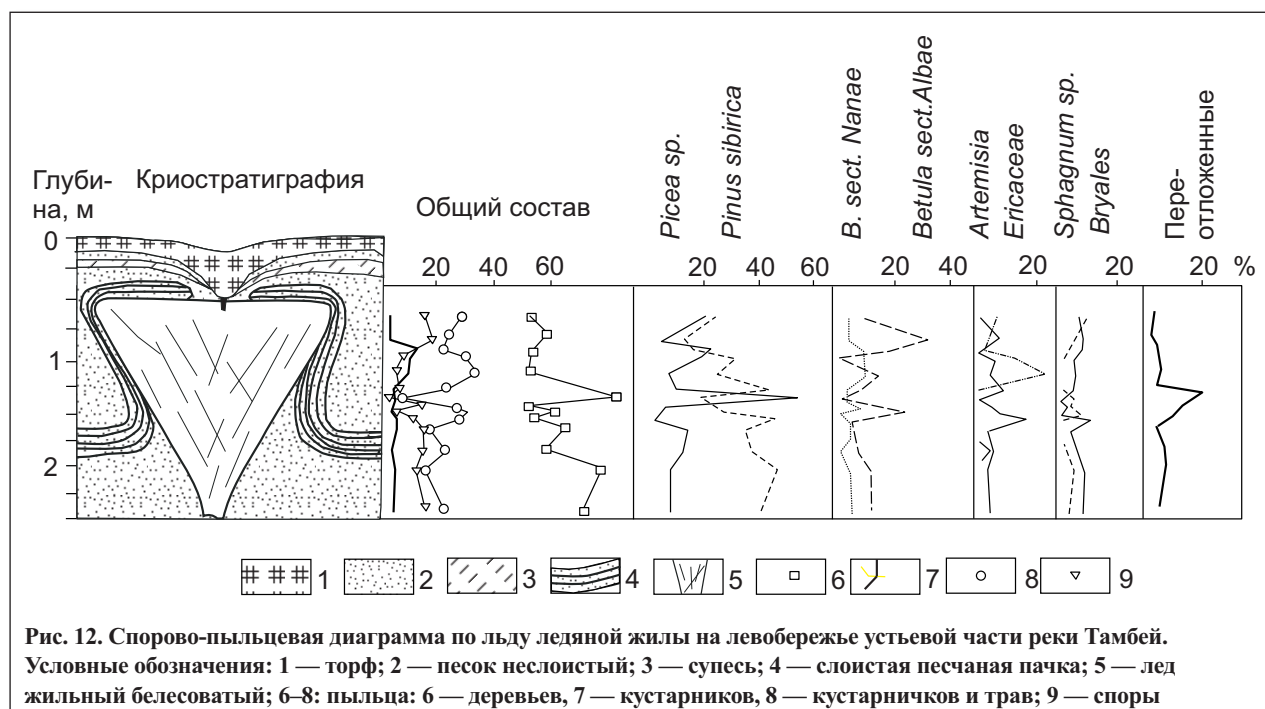




Таблица 4

Содержание и состав водорастворимых солей в отложениях, вмещающих повторно-жильных льды, в разрезе поймы реки Тамбей для скважины 195-YuV

№ образца	Глубина отбора, м	Грунт	Сухой остаток, %	Содержание ионов, мг-экв						Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻ *	pH
				HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺		
195-YuV/3	0,6–0,7	Песок оторф.	0,214	0,08	2,40	0,44	0,18	0,26	2,48	5,45	6,20
195-YuV/7	2,9–3,0	Песок	0,308	0,04	3,10	0,41	0,18	0,28	3,09	7,56	5,10
195-YuV/9	4,2–4,4	Песок	0,222	0,06	2,20	0,43	0,16	0,34	2,19	5,11	6,00
195-YuV/11	5,5–5,7	Песок	0,279	0,04	2,00	1,35	0,22	0,42	2,75	1,48	5,95
195-YuV/14	7,8–8,0	Песок	0,173	0,00	0,80	1,07	0,26	0,48	1,13	0,75	4,52
195-YuV/16	8,5–8,6	Песок	0,347	0,04	5,10	1,76	0,18	0,52	6,20	2,90	5,55

* Соотношение содержания ионов Cl⁻ и SO₄²⁻.

Таблица 5

Содержание и состав водорастворимых солей в повторно-жильных льдах в разрезе поймы реки Тамбей для скважины 193-198-YuV

№ образца	Глубина отбора, м (расстояние от оси*)	Общая минерализация, мг/л	Содержание ионов, мг/л							Cl ⁻ /SO ₄ ²⁻ **	pH
			HCO ₃ ⁻	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ +K ⁺	Fe общ.		
193-YuV/5	0,90–1,50	88,0	18,3	19,1	5,8	4,6	3,9	9,4	0	3,30	5,00
194-YuV/6	2,40–3,00	76,0	12,2	15,2	7,4	3,6	1,7	10,6	0	2,05	5,35
194-YuV/7	3,20–3,50	86,0	12,2	18,3	4,1	4,6	1,1	10,1	0,7	4,46	5,45
195-YuV/5	1,50–2,00	308,0	122,0	25,3	2,3	13,0	9,0	1,6	24,2	11,00	6,80
195-YuV/6	2,10–2,80	150,0	36,6	46,4	9,1	9,2	3,4	30,4	0,7	5,10	5,95
197-YuV/4	1,60–2,30	192,0	122,0	25,9	14,0	7,4	2,2	3,9	43,0	1,85	6,10
198-YuV/2	0,60–0,75 (-0,35÷-0,65)	52,0	12,2	13,1	3,3	3,6	1,7	4,1	2,6	3,96	5,65
198-YuV/13	2,10–2,30 (+0,20)	56,0	2,4	21,3	4,1	3,6	2,9	6,4	0,3	5,20	4,35
198-YuV/14	2,10–2,30 (-0,20)	68,0	12,2	23,8	4,9	5,6	1,7	11,3	1,1	4,86	5,50
198-YuV/15	2,50–2,70	64,0	12,2	23,0	4,1	3,6	1,7	13,1	0,8	5,61	5,3
198-YuV/16	0,60–0,82 (+0,19)	48,0	12,2	11,3	3,3	3,6	1,2	5,5	1,3	3,42	4,85
198-YuV/18	0,60–0,82 (-0,18)	68,0	9,8	21,3	4,9	3,6	1,7	10,8	1,2	4,35	5,20
198-YuV/19	0,82–1,06 (+0,16÷+0,33)	64,0	6,1	25,2	4,1	4,6	1,7	11,5	0,3	6,15	4,65
198-YuV/20	0,82–1,06 (+0,16)	52,0	12,2	16,0	4,9	3,6	1,2	6,7	3,3	3,27	5,75
198-YuV/22	1,07–1,20 (+0,22)	60,0	9,8	17,4	5,8	3,6	1,2	9,7	1,2	3,00	5,80
198-YuV/23	1,07–1,20 (-0,20)	52,0	6,1	20,6	3,3	3,6	1,7	9,0	0,8	6,24	4,75
198-YuV/25	1,50–1,80 (+0,20)	60,0	12,2	16,0	4,9	3,6	1,2	9,2	1,2	3,27	6,30
198-YuV/26	0,62–0,91 (+0,20)	92,0	14,6	18,4	8,2	2,2	2,1	13,8	0,7	2,24	6,15
198-YuV/28	1,14–1,40 (+0,20)	130,0	54,9	21,3	4,9	5,2	9,7	17,7	8,7	4,35	4,15
198-YuV/30	1,60–2,00(+0,20)	124,0	61,0	22,3	4,9	4,6	8,4	0	14,7	4,55	4,10
198-YuV/31	1,60–2,00 (-0,20)	84,0	18,3	23,7	8,2	2,8	3,3	15,6	0,7	2,90	5,05
198-YuV/32	0,55–0,74 (+0,10÷+0,20)	76,0	14,6	16,0	7,4	1,8	2,3	11,7	0,7	2,20	5,15
198-YuV/33	0,55–0,74 (-0,10÷0,20)	104,0	14,6	14,5	17,3	2,2	2,1	15,6	0,7	0,84	5,15
198-YuV/34	1,10–1,40 (+0,1÷+0,2)	62,0	14,6	13,1	3,3	1,8	0,2	12,2	0,7	4,00	5,10
198-YuV/35	1,10–1,40 (-0,10÷-0,20)	80,0	36,6	13,1	5,8	4,0	3,1	8,7	4,6	2,26	4,90
198-YuV/36	1,50–1,85 (+0,10÷+0,20)	76,0	24,4	17,4	3,7	11,0	2,2	5,3	0,1	4,70	6,15
198-YuV/37	1,50–1,85 (+0,10÷+0,20)	140,0	18,3	12,1	3,7	5,6	3,4	3,4	0,2	3,27	4,95

* «+» — расстояние от оси вправо; «-» — расстояние от оси влево.

** Соотношение содержания ионов Cl⁻ и SO₄²⁻.



Таблица 6

Содержание пыльцы и спор, %*, в отложениях поймы устьевой части реки Тамбей для скважины 198-YuV							
Принадлежность пыльцы или спор		Номер образца (глубина отбора, м)					
		40 (0,2)	42 (0,5)	43 (0,8)	44 (0,9)	48 (2,3)	49 (2,5)
Пыльца	деревьев	27	46	34	35	69	58
	кустарников	11	34	27	13	12	17
	трав и кустарничков	41	10	29	23	18	12
Споры (общее содержание)		21	10	10	29	1	13
Пыльца или споры отдельных родов или видов растений	Pinus sibirica	16	14	14	16	13	6
	Picea	2	3	4	3	16	4
	Alnus	2	4	-	-	6	4
	Betula	7	25	16	16	34	44
	Betula sect. Nanae	7	32	26	13	12	14
	Alnaster	-	2	1	-	-	1
	Salix	4	-	-	-	-	2
	Poaceae	5	5	2	7	6	3
	Ericaceae	3	5	16	-	3	4
	Artemisia	6	-	5	10	1	3
	Varia	27	-	6	6	8	2
	Bryales	5	2	9	19	-	8
	Sphagnum sp.	14	3	1	3	-	2
	Polypodiaceae	2	5	-	7	1	3
Общее количество, экз./г**		97	59	74	62	65	138

* Содержание пыльцы отдельных компонентов спектра приводится в процентах от ее общего количества.

** Экземпляров спор и пыльцы на 1 г грунта.

Таблица 7

Содержание пыльцы и спор, %*, в повторно-жильном льду в разрезе поймы реки Тамбей для скважины 198-YuV															
Принадлежность пыльцы или спор		Номер образца (глубина отбора, м)													
		1 (0,4)	2 (0,4)	3 (0,4)	4 (0,4)	6 (0,7)	7 (0,7)	20 (0,8)	21 (0,8)	27 (0,8)	8 (1,0)	9 (1,0)	10 (1,1)	29 (1,2)	15 (2,4)
Пыльца	деревьев	52	57	58	56	53	68	86	54	61	56	64	59	69	61
	кустарников	4	4	11	9	9	3	6	5	3	4	4	3	4	5
	трав и кустарничков	28	21	20	28	33	23	6	27	30	28	16	22	15	21
Споры (общее содержание)		16	18	11	7	5	6	2	14	6	12	16	16	12	13
Пыльца или споры отдельных родов или видов растений	Pinus sibirica	20	12	19	36	28	45	22	26	28	48	34	36	45	38
	Picea	20	8	22	20	9	10	58	7	6	4	18	17	11	13
	Alnus	-	-	-	-	3	3	3	4	5	-	8	-	2	-
	Betula	12	37	17	-	13	10	3	17	24	4	4	6	11	10
	Betula sect. Nanae	4	4	9	9	9	3	3	5	-	4	4	-	4	5
	Alnaster	-	-	2	-	-	-	3	-	3	-	-	3	-	-
	Poaceae	4	2	14	-	4	10	3	13	16	4	8	10	11	7
	Cyperaceae	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Ericaceae	4	6	2	13	23	-	-	2	3	-	-	6	-	3
	Artemisia	-	-	-	-	-	-	-	3	8	20	4	3	2	3
	Varia	20	1	2	8	2	6	3	9	3	4	4	3	2	8
	Bryales	8	6	3	-	-	3	2	8	-	4	-	3	2	3
	Sphagnum sp.	8	7	8	2	5	3	-	4	6	4	8	7	4	5
	Polypodiaceae	-	5	-	5	-	-	-	2	-	4	8	6	6	5
Общее количество, экз./дм ³ **		100	138	128	166	150	124	126	117	72	100	103	123	116	68

* Содержание пыльцы отдельных компонентов спектра приводится в процентах от ее общего количества.

** Экземпляров спор и пыльцы на 1 дм³ (1 л) повторно-жильного льда.

Просадка при протаивании пойменных отложений с повторно-жильными льдами (рис. 13, а) может происходить разными путями в зависимости от воздействий на них и в зависимости от того, будет ли дренироваться вода, возникшая при протаивании льда.

Наихудшая ситуация для сооружений — когда вода от таяния ПЖЛ начинает накапливаться в сформировавшейся котловине. Если вода, возникшая при протаивании, не дренируется, то образуется озеро и, соответственно, возникает аварийная ситуация для сооружений (рис. 13, б). При интенсивной термоэрозионной активности и беспрепятственном стоке по полигональным канавкам над жилами формируется плоскобугристый, или байджерачный, рельеф (рис. 13, в). Если воздействие равномерно, а грунт достаточно пластичен, то при протаивании жил он может распределяться, заполняя возникающие пустоты (рис. 13, г). Если грунт недостаточно пластичен или, в отличие от жильных льдов, не протаял, то осадка будет неравномерной и ее величина будет определяться размерами ледяных жил и глубиной их протаивания. Такая ситуация может возникнуть, например, при применении сезонно-охлаждающих устройств (СОУ). Состояние объекта будет зависеть от его прочностных характеристик и конструкции. Подобные преобразования во времени в процессе непосредственных наблюдений за измене-

нием верхних горизонтов отложений с повторно-жильными льдами хорошо описаны П.П. Гаврильевым [7].

О деформациях льда и вмещающей породы

Первый исследователь повторно-жильных льдов на Аляске Леффингвелл (E. de K. Leffingwell) в начале XX века писал: «Иногда в местах, где обнажение вскрывало нижнюю часть толщи, в ней наблюдались песчаные или глинистые прослои. Когда ледяной клин растет в толщину и прижимается к краю этих пластов, они могут наклониться или даже перевернуться, в результате чего на поверхности формируются валики, которые располагаются по бокам трещины... В постоянно мерзлом грунте в течение холодных арктических зим формируются трещины, которые разделяют поверхность на полигональные блоки. Весной эти трещины заполняются водой, которая сразу же замерзает. Во время роста температуры в летний период жилки льда могут быть более жесткими, чем вмещающие породы, в результате чего позже происходит приспособление породы к давлению. Все это приводит к выпучиванию всего полигона в целом либо участков на контакте со льдом» [20, с. 646, 654] (рис. 14, б)

В отложениях первой надпойменной террасы на правом берегу реки Омолы в 15 км ниже поселка Хайыр

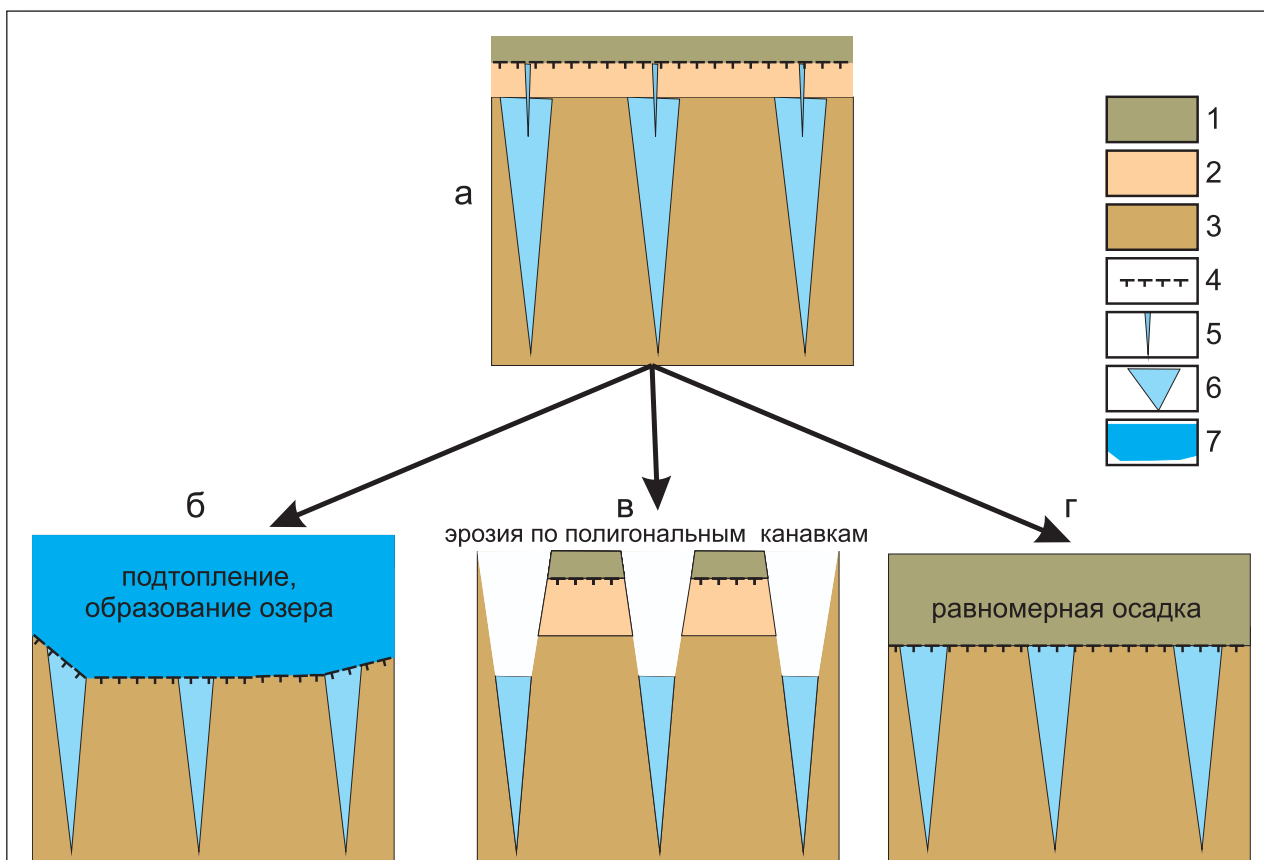


Рис. 13. Возможные последствия частичного протаивания повторно-жильного комплекса (а), расположенного в пределах высокой поймы реки Тамбей. При отсутствии стока после частичного протаивания образуется термокарстовое озеро, под которым сохраняются остатки жил (б). При активной термоэрозии и беспрепятственном стоке по полигональным канавкам над жилами формируется плоскобугристый, или байджерачный, рельеф (в). При активном дренаже и наличии площадного стока даже при частичном протаивании происходит заметная общая осадка поверхности (г). Условные обозначения: 1 — сезонно-талый слой (СТС); 2 — сильнольдистые отложения над повторно-жильным льдом; 3 — отложения полигонально-жильного комплекса; 4 — граница слоя сезонного оттаивания; 5 — росток жильного льда; 6 — повторно-жильный лед; 7 — вода



А.Д. Маслов [11] описал ледяную жилу ступенчатой формы (рис. 15, а–в). Вмещающими ее породами являются чередующиеся по вертикали суглинки и торф. По конфигурации жилы и по чередованию вмещающих ее суглинка и торфа довольно четко выделяются четыре ее ледяные ступени. Слоистые пачки суглинка, подходя к боковым частям ступеней, отгибаются вверх. Причем у боковых контактов нижней ступени слои суглинка деформированы больше, чем у верхних ступеней. У самой верхней слои суглинка почти совсем недеформированные. Слои торфа, подходя к жиле, ложатся на плечи ступеней, а в некоторых случаях оконтуривают их с боков. Таким образом, здесь выделяются четыре цикла развития ледяной жилы, причем каждому из них соответствуют определенные пачки суглинка и перекрывающего его торфа.

В нижнем течении реки Яна А.Г. Костяев [10] описал ледяную жилу (достигающую 75 см в ширину), находящуюся в верхней части антиклинальной складки. Порода, вмещающая жилу, состоит из гори-

зонтально-слоистых супесей коричневатого, сизовато-серого и желтоватого цвета. Лыдность, постепенно уменьшается книзу, где появляется значительная примесь песчаного материала. Слои вмещающей породы ведут себя по-разному у левого и правого контактов ледяной жилы. Слева они полого падают внутрь полигона, где вскоре приобретают залегание, близкое к горизонтальному. У правой части жилы слои уже на расстоянии 0,5 м начинают изгибаться вверх, чтобы около самой жилы принять круто вертикальное и даже опрокинутое положение. Ледяные прослои мощностью до 1 см следуют согласно изгибам осадочных слоев. Антиклинальная структура имеется и под ледяной жилой. Она хорошо выражена благодаря большой амплитуде подъема слоев в центре — не менее 45–50 см (см. рис. 15, г). Слои, образующие антиклиналь, представлены чередованием сероватой супеси (2–3 см) и коричневатого-желтого глинистого песка (0,5–1,0 см). Мерзлотная текстура выражена тонкими (2–4 мм) частично разлинзован-

Таблица 8

Макрольдистость мерзлой толщи высокой поймы приустьевое участка реки Тамбей					
Высота пирамиды*, м	Размер полигонов, м×м	Ширина ледяной жилы, м	Объем прямоугольного параллелепипеда V ₁ , м ³	Объем ПЖЛ**, м ³	Льдность, %
1	50×70	2,5	3500	163,1	4,7
	12×17	2,5	204	38,0	18,6
	7×10	2,5	70	21,5	30,7
	50×70	2,0	3500	148,4	4,2
	12×17	2,0	204	34,7	17,0
	7×10	2,0	70	19,7	28,1
	50×70	1,0	3500	89,4	2,6
	12×17	1,0	204	20,6	10,1
	7×10	1,0	70	12,2	17,4
3	50×70	2,5	10500	224,3	2,1
	12×17	2,5	612	52,9	8,6
	7×10	2,5	210	30,4	14,5
	50×70	2,0	10500	179,0	1,7
	12×17	2,0	612	42,5	6,9
	7×10	2,0	210	24,5	11,7
	50×70	1,0	10500	89,7	0,9
	12×17	1,0	612	21,5	3,5
	7×10	1,0	210	12,5	6,0

* Высота пирамиды — мощность толщи многолетнемерзлых пород с повторно-жильным льдом.

** ПЖЛ — повторно-жильный лед.

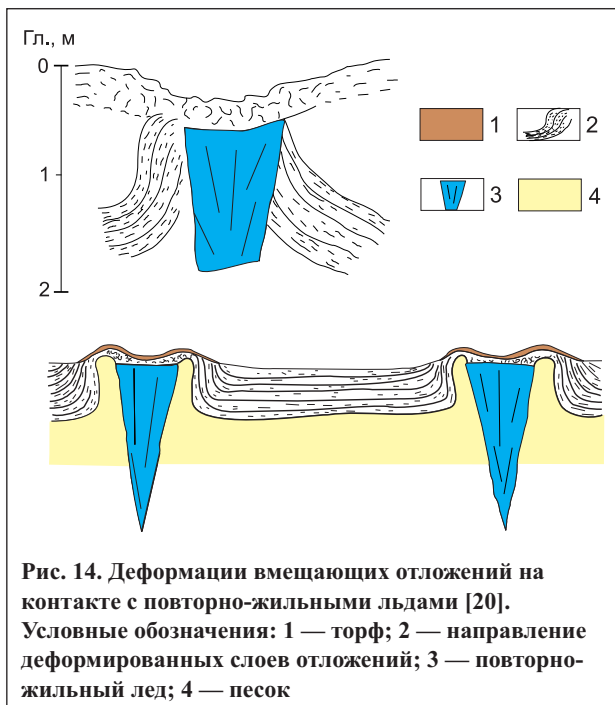


Рис. 14. Деформации вмещающих отложений на контакте с повторно-жильными льдами [20].
Условные обозначения: 1 — торф; 2 — направление деформированных слоев отложений; 3 — повторно-жильный лед; 4 — песок

ными ледяными прослойками, полностью повторяющими ход минеральных слоев.

Необычен антиклинальный подъем слоев под ледяной жилой. Куполообразное расположение слоев наводит на мысль о пучении, против чего, по мнению А.Г. Костяева, свидетельствуют весьма малая льдистость пойменных отложений и закономерное расположение вершин антиклиналей точно под центрами жил [10].

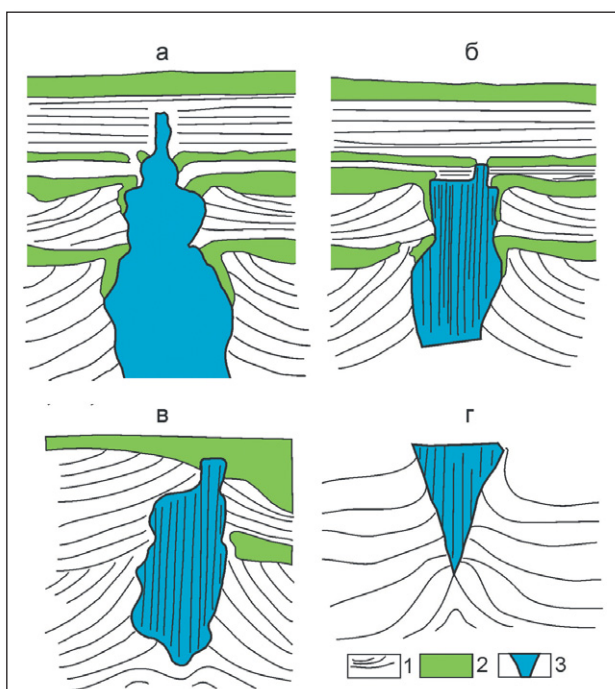


Рис. 15. Деформации вмещающих отложений на контакте с повторно-жильными льдами в голоценовых отложениях: а–в — на правом берегу реки Омлой в 15 км ниже поселка Хайыр [11]; г — в нижнем течении реки Яна [10]. Условные обозначения: 1 — направление деформированных слоев отложений; 2 — торф; 3 — повторно-жильный лед

История формирования Тамбейского пойменного полигонально-жильного массива

На основе данных гидрохимического и палинологического анализа была восстановлена история формирования повторно-жильного льда полигонального комплекса пойменного массива долины Тамбея в голоцене (рис. 16).

В период голоценового оптимума (вероятно, чуть более 5 тыс. лет назад) сформировалась песчаная толща руслового аллювия. Переход поверхности в пойменный режим развития в конце периода голоценового оптимума ознаменовался формированием слоистой пачки оторфованных пылеватых песков.

Повышенная льдистость верхнего горизонта отложений и малое количество снега на поверхности поймы, характерное для конца периода голоценового оптимума, предопределили интенсивное морозобойное растрескивание и зарождение ледяных жил (см. рис. 16, А). Часть жил развивалась более интенсивно (см. рис. 16, А, а) — и они достигли больших размеров в ширину к концу рассматриваемого периода, что, возможно, было определено более поздним зарождением других (см. рис. 16, А, б). Формировавшийся в тот период жильный лед характеризовался сравнительно высокой солесностью.

В послеоптимальное время эвстатическое повышение уровня моря привело к установлению субаквального режима на рассматриваемом участке. В это время откладывались пылеватые пески, промерзание которых происходило после частичного диагенеза. Это определило малые значения льдистости пылеватых песков. Сравнительно высокое значение льдистости горизонта слоистых оторфованных песков объясняется, по-видимому, их промерзанием в субаквальных условиях. Морозобойного растрескивания на участке не происходило, жилы оказались в законсервированном состоянии (рис. 16, Б).

Затем (около 2 тыс. лет назад) уровень моря понизился. На поверхности массива вновь начал накапливаться оторфованный песок. Его накопление вызвало уменьшение мощности деятельного слоя. Оторфованный песок промерзал сингенетически с формированием характерной линзовидно-шлировой криогенной текстуры. В этот период происходит зарождение более молодой генерации повторно-жильных льдов (рис. 16, В, а, б). Внедрение дополнительных масс льда привело к увеличению напряженного состояния массива, что вызвало выжимание законсервированных ранее жил. Жилы, имевшие большие размеры, выжимались интенсивнее и через некоторое время оказались вблизи границы сезонного протаивания. Это благоприятствовало возникновению в них морозобойных трещин (рис. 16, В, а) и продолжению их роста.

По мере выжимания захороненных жил увеличивалась деформация перекрывавшего их маркирующего слоистого песчаного горизонта. Размеры образовавшихся складок коррелировали с приростом в массиве макро- и мезотекстурообразующего льда за время, прошедшее с конца голоценового оптимума, когда слои залегали горизонтально. Над более узкими захороненными жилами, которые выжимались менее интенсивно, складки были меньше, они имели округлый практически ненарушенный и не разбитый трещинами за-

мок. У широких растущих ранее захороненных жил замок складки в апикальной части был, наоборот, разорван морозобойными трещинами.

Период около 1 тыс. лет назад характеризовался некоторым затуханием интенсивности морозобойного растрескивания, что было вызвано ослаблением степени континентальности климата, а возможно, и незначительным повышением уровня моря, с которым связано отложение прослоя песка в интервале 0,1–

0,2 м. Это привело к временному прекращению роста наиболее узких жил (см. рис. 16, Г, б, в). Продолжался лишь прирост жил средней ширины (в том числе современных широких) (см. рис. 16 Г, а, з) — модальных [12]. Это привело к метаморфизму льда узких жил, что выразилось в изменении морфологии и габитуса кристаллов, выжимании автогенных и ксеногенных газовых включений, формировании катакластических текстур. Метаморфизм льда происходил также в растущих жилах, однако постоянное внедрение новых элементарных жилок, имеющее нелокализованный характер, затушевало результаты метаморфизма.

В заключительный — современный — период (последнюю 1 тыс. лет) своего формирования полигонально-жильный комплекс вновь испытал интенсивный прирост. Одной из причин этого было установление стабильного субэдрального состояния поймы и активное торфонакопление. Очевидно, увеличился индекс континентальности климата, несколько понизились среднегодовые температуры грунта. Это вызвало активизацию морозобойного растрескивания, привело к более глубокому проникновению трещин, в результате чего произошло «оживление» законсервированных ранее узких жил. Очевидно, морозобойное растрескивание в них происходило по одному из боковых контактов, где сцепление льда с породой оказалось меньше, чем внутри метаморфизованного льда. Это привело к образованию вертикально ориентированных зон (шириной 0,2–0,3 м) молочно-белого льда в узких жилах (см. рис. 16, Д, б, в). Увеличение объема жильного льда привело к интенсивному выжиманию вверх как широких, так и узких жил. При этом более древняя из них (см. рис. 16, Д, б), возникшая в атлантический период во время формирования слоистых оторфованных песков (голова жил располагались ниже горизонта песков на толщину слоя сезонного протаивания), выжимаясь вверх, «толкала» шарнир, облекающий складки. Это привело к уравниванию высоты складок у древней узкой жилы со складками у наиболее широкой жилы. Изогнутость слоев у контактов с жилами, возникших позднее, увеличилась незначительно. В заключительный период произошло также зарождение наиболее узких (до 0,1 м шириной, 0,8–1,0 м высотой) из описанных в массиве жил без деформаций слоистости вмещающих отложений.

Авторы не исключают также возможность роста широких жил в субаквальных условиях, хотя, по-видимому, прирост был менее интенсивным. Лед был более засоленным, однако количество его было небольшим. Доля такого льда в строении широких жил невелика, общий фон здесь формирует «пресный» лед, образовавшийся в субэдральной обстановке. Логично предположить, что растрескивание широких жил имело нелокализованный характер, поэтому в них не сохранилось ненарушенных участков с первичной повышенной соленостью. Растрескивание часто происходит в центральной части жил, но трещины вдоль бокового контакта узких формирующихся жил авторы неоднократно наблюдали в поймах и на лайдах Ямала и Гыдана.

Деформации вмещающих отложений на контакте с минерализованными ледяными жилами были отмечены авторами на лайде Гыданской губы в 1,2 км севернее устья реки Монгаталянгяха [5]. Здесь повторно-жильные льды залегают в отложениях высокой лай-

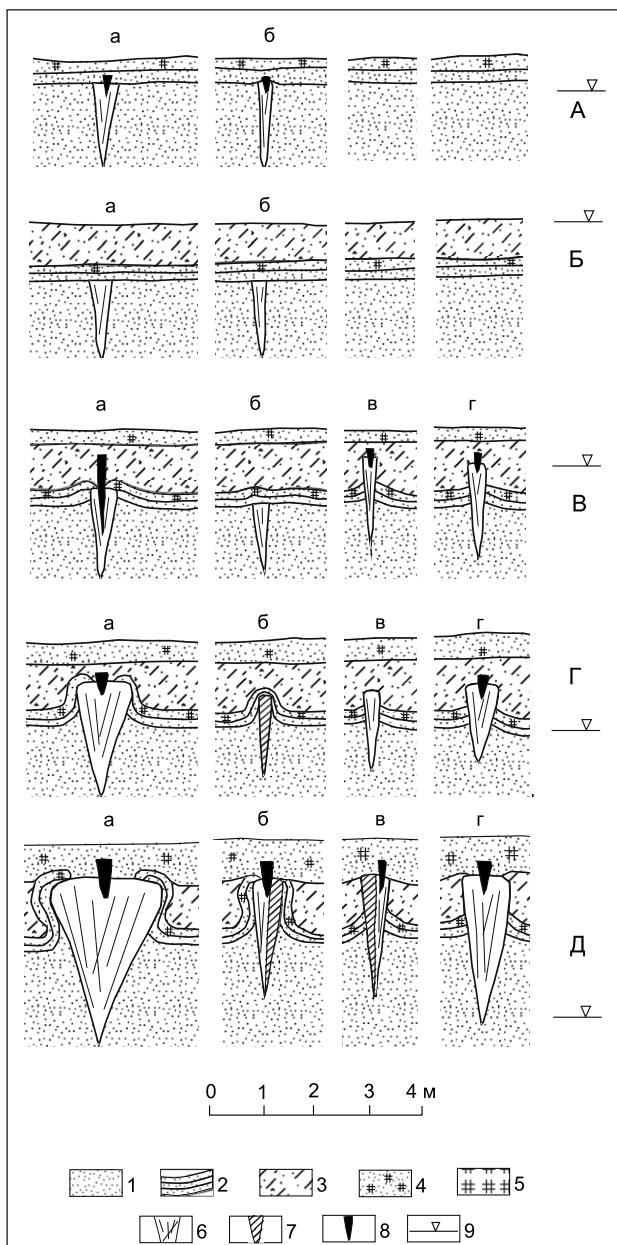


Рис. 16. Принципиальная схема последовательности (а–г) развития повторно-жильных льдов в низовьях реки Тамбей в голоцене: А — в период оптимума; Б — в начале послеоптимального периода; В — в середине послеоптимального периода; Г — в конце послеоптимального периода субатлантического периода; Д — на современном этапе. Условные обозначения: 1 — песок пылеватый мелкозернистый; 2 — маркирующий горизонт слоистых оторфованных песков; 3 — песок пылеватый мелкозернистый; 4 — торф опесчаненный; 5 — торф; 6 — жильный лед молочно-белый слабометаморфизованный; 7 — жильный лед прозрачный сильнометаморфизованный; 8 — лед жильного роста; 9 — уровень моря и реки

ды (описано более 20 жил), жилы достигают в верхней части ширины 2,5 м [21].

Выводы

1. Рассмотрены повторно-жильные структуры, определяющие инженерно-геологические условия освоения поймы реки Тамбей в северной части лицензионного участка Южно-Тамбейского газоконденсатного месторождения.

2. Выполнено исследование субфоссильных палиноспектров, содержания спор и пыльцы, а также химического состава как непосредственно ледяных жил, так и вмещающих их отложений.

3. Детально рассмотрен характер деформаций вмещающих пород на контактах с ледяными жилами, образующих веерообразные изоклинальные складки маркирующего горизонта слоистых оторфованных песков на участках развития как широких, так и узких ледяных жил, зародившихся в конце оптимального периода голоцена.

4. Реконструирована принципиальная схема последовательности развития повторно-жильных льдов в ни-

зовьях реки Тамбей в голоцене. Показано, что лед жил с деформациями вмещающих отложений на контакте выдавливался по мере расклинивания жил при активизации морозобойного растрескивания.

5. Рассчитаны значения макрольдистости пойменного массива на глубину 1 и 3 м и потенциальных осадков при частичном и полном протаивании жил.

6. Рассмотрены возможные последствия частичного протаивания повторно-жильного комплекса в пределах высокой поймы реки Тамбей и их влияние на сооружения при отсутствии стока, при активной термоэрозии, при активном дренаже и при наличии площадного стока.

6. Сравнение результатов геотемпературных замеров по скважинам, выполненных в 1978 и 2013 гг., показало весьма заметный рост среднегодовых температур на севере Ямала за 35 лет, составивший более 5 °С.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (грант № 14-27-00083 — Ю. Васильчук) и РФФИ (грант № 14-05-00930 — А. Васильчук).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андреев М.П. Лишайники арктических тундр верховьев р. Тамбей (полуостров Ямал) // Новости систематики низших растений. 1982. Т. 19. С. 111–116.
2. Васильчук А.К. Особенности формирования палиноспектров в криолитозоне России. М.: Изд-во Московского университета, 2005. 245 с.
3. Васильчук А.К. Палинология и хронология полигонально-жильных комплексов в криолитозоне России / под ред. Ю.К. Васильчука. М.: Изд-во Московского университета, 2007. 488 с.
4. Васильчук Ю.К. Новый подход к расчету макротекстурообразующей льдистости за счет повторно-жильных льдов // Инженерная геология. 2009. № 4. С. 40–47.
5. Васильчук Ю.К. Повторно-жильные льды; гетероцикличность, гетерохронность, гетерогенность. М.: Изд-во Московского университета, 2006. 404 с.
6. Виноградова Е.Л. Временная и пространственная неоднородности гидрохимической структуры вод на верхних границах маргинальных фильтров Оби и Енисея: автореф. дис... канд. геогр. наук. М. Изд-во ИО РАН, 2012. 24 с.
7. Гаврильев П.П. Мелиорация и рациональное использование земель в Якутии при наличии подземных льдов (научно-методические рекомендации). Якутск: Изд-во ИМЗ СО РАН СССР. 1991. 72 с.
8. Гидрология заболоченных территорий зоны многолетней мерзлоты Западной Сибири / под ред. С.М. Новикова. СПб.: ВМ, 2009. 536 с.
9. Егоров В.В., Фридланд В.М., Иванова Е.Н., Розов Н.Н. и др. Классификация и диагностика почв СССР. М.: Колос, 1977. 221 с.
10. Костяев А.Г. Ледяные жилы и конвективная неустойчивость грунтов // Подземный лед. Вып. 1. М.: Изд-во Московского университета, 1965. С. 133–140.
11. Маслов А.Д. Сингенез полигонально-жильного льда и эпигенетические этапы его развития // Подземный лед. Вып. 3. М.: Изд-во Московского университета, 1967. С. 57–64.
12. Подборный Е.Е. Время и интенсивность образования морозобойных трещин // Проблемы криолитологии. Вып. 7. М.: Изд-во Московского университета, 1978. С. 132–140.
13. Попов П.А. Адаптация гидробионтов к условиям обитания в водоемах Субарктики на примере экологии рыб в водоемах Субарктики Западной Сибири. Новосибирск. Изд-во Новосибирского университета, 2012. 255 с.
14. Природа Ямала. Екатеринбург: Наука, 1995. 436 с.
15. Тарбеева А.М., Сурков В.В. Четковидные русла малых рек зоны многолетней мерзлоты // География и природные ресурсы. 2013. № 3. С. 27–32.
16. Трофимов В.Т., Баду Ю.Б., Кудряшов В.Г., Фирсов Н.Г. Полуостров Ямал. М.: Изд-во МГУ, 1975. 278 с.
17. Чертежная книга Сибири, составленная тобольским сыном боярским Семеном Ремезовым в 1701 г. СПб., 1882.
18. Шишов Л.Л., Тонконозов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.
19. Эрозионные процессы Центрального Ямала. СПб.: Изд-во РНИИ культурного и природного наследия. 1999. 350 с.
20. Leffingwell E.K. Ground ice wedges: the dominant form of ground-ice on the North Coast of Alaska // The Journal of Geology. 1915. V. 23. № 7. P. 635–654.
21. Vasil'chuk Yu.K., Trofimov V.T. Cryohydrochemical peculiarities of ice-wedge complexes in the north of Western Siberia // Proceedings of the 4-th International Conference of Permafrost, Fairbanks, Alaska. Washington: National Academy Press, 1983. P. 1303–1308.