

БИОГЕОХИМИЯ МЕРЗЛЫХ ТОЛЩ АРКТИЧЕСКОГО ПОБЕРЕЖЬЯ ПОЛУОСТРОВА ГЫДАН

канд. геол.-минерал. наук Н.Э. ДЕМИДОВ¹, канд. геогр. наук А.В. БАРАНСКАЯ²,
канд. биол. наук Е.В. ДУРДЕНКО¹, канд. биол. наук О.Г. ЗАНИНА¹,
мл. науч. сотр. Е.С. КАРАЕВСКАЯ¹, канд. геол.-минерал. наук З.В. ПУШИНА³,
канд. геол.-минерал. наук Е.М. РИВКИНА¹, ст. науч. сотр. Е.В. СПИРИНА¹,
д-р философии Р. СПЕНСЕР⁴

¹ — ФАНО ФГБУН Институт физико-химических и биологических проблем почвоведения, РАН, Пуцино, e-mail: nikdemidov@mail.ru

² — Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, г. Москва, e-mail: alisa.baranskaya@yandex.ru

³ — ГИЦ РФ Арктический и антарктический научно-исследовательский институт, Санкт-Петербург, e-mail: musatova@mail.ru

⁴ — Университет Флориды, Таллахасси, США

В четырех районах арктического побережья полуострова Гыдан проведено колонковое бурение и отобраны керны мерзлых отложений. Комплекс лабораторных анализов впервые позволил дать биогеохимическую характеристику мерзлых толщ на Гыдане, сравнить полученные результаты с другими районами криолитозоны и применить их для палеореконструкций.

Ключевые слова: полуостров Гыдан, метан в мерзлоте, микроорганизмы в мерзлоте, углерод в мерзлоте.

ВВЕДЕНИЕ

Полуостров Гыдан, занимающий центральное положение в Западно-Сибирской Арктике, с поверхности практически целиком сложен мерзлыми осадками четвертичного возраста и характеризуется значительной изрезанностью береговой линии. В результате этого термоабразия мерзлых толщ побережья приводит к попаданию в Северный Ледовитый океан биогенных элементов, органического вещества и жизнеспособных микроорганизмов, а также к высвобождению в атмосферу парниковых газов, законсервированных в мерзлоте. Увеличение глубины сезонного оттаивания и активизация термокарста способствует их вовлечению в современный биогеохимический цикл. Для моделирования влияния этих процессов на океанические экосистемы и их потенциального вклада в парниковый эффект необходима региональная биогеохимическая характеристика основных геологических провинций криолитозоны, прежде всего провинций, слагаемых мерзлыми дисперсными породами кайнозойского возраста.

Цель данного исследования — комплексная биогеохимическая характеристика мерзлых толщ Гыдана. Такого рода работы ранее на этой территории не проводились, а предшествующие публикации по данной тематике базировались в основном на материале, полученном на приморских низменностях Якутии, Аляски и в Антарктиде

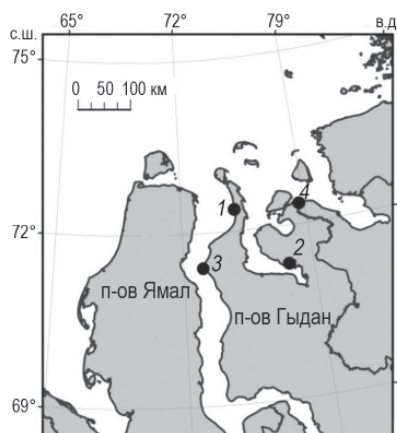


Рис. 1. Районы проведения работ.

(Ривкина и др., 2006; Шмелев и др., 2013; Гиличинский и др., 1989; Steven et al., 2007; Vorobyova et al., 1997; Price and Sowers, 2004; Rivkina et al., 2007).

Вопрос о происхождении толщ четвертичных отложений, о роли оледенений и морских трансгрессий в позднеплейстоценовой истории севера Западной Сибири до сих пор остается дискуссионным; опорные стратотипические разрезы четвертичных отложений на Гыданском полуострове отсутствуют. В отличие от соседнего Ямала, на Гыдане не проходило развертывание нефтегазодобывающей инфраструктуры, в связи с этим он остается наименее исследованной частью севера Западной Сибири. Биогеохимическая характеристика мерзлых толщ Гыдана, освещенная в данной работе, проводилась на ранее не изученных обнажениях. Полевые работы проводились в августе–октябре 2013 г. в ходе комплексной экспедиции «Ямал–Арктика 2013» на четырех участках, охвативших центральную, восточную и западную части побережья полуострова Гыдан (рис. 1).

МЕТОДЫ

Бурение осуществлялось буровой установкой УКБ-12/25, без промывки и продувки, что обеспечило сохранение мерзлого состояния кернов для их корректного литологического описания и предотвращения их химической и биологической контаминации (Gilichinsky et al., 1995). Керны поднимались на поверхность через каждые 30–70 см проходки, после литологического описания и описания криотекстур часть кернов в мерзлом виде помещалась в морозильную камеру и с этого момента вплоть до доставки в лаборатории хранилась при постоянной отрицательной температуре. Замер температуры в скважине производился не менее чем через сутки после окончания бурения с помощью термокосы ПНИИИС.

Полевые маршрутные исследования проводились вдоль морского берегового уступа в стороны от места заложения опорных скважин, что позволило как получить представление о геологическом строении района работ на основе геоморфологических и литологических наблюдений, так и оценить степень репрезентативности отобранных из скважины кернов для всего исследуемого района побережья. Геологические тела, их контакты и залегание друг относительно друга прослеживались вдоль всего берегового уступа: производилось их подробное изучение в расчистках, отбирались образцы.

Анализ содержания водорастворимых солей в отложениях проводился по стандартной методике (Аринушкина, 1970). Соли извлекали добавлением воды в соотношении 1:5 по отношению к массе сухого образца. Дегазация образцов для определения концентрации метана осуществлялась в полевых условиях непосредственно после получения кернов методом «head space» (Alperin, Reeburgh, 1985) в шприцах емкостью 150 мл. Содержание метана в пробах определялось в лаборатории на газовом хроматографе ХПМ-4 (Россия), оборудованном пламенно-ионизационным детектором (Ривкина и др., 2006). Общее содержание углерода определялось на аппарате АН 752 У (Россия). Сжигание образца осуществлялось при температуре 1100 °С в токе кислорода с последующим потенциометрическим титрованием. Определение органического углерода проводилось методом мокрого сжигания с бихроматом калия.

Микробиоморфный анализ представлял собой сопряженное изучение под микроскопом компонентов биогенной фракции образца (пыльцы, спор, древесного и травянистого детрита, грибных грифов и их плодовых тел, углистых частиц и биогенного кремнезема, т.е. фитолитов, диатомовых водорослей, спикул губок, раковин амёб) с последующим обзором всего комплекса в целом (Гольева, 2008). На предварительном этапе подсчет створок диатомей в полных образцах не производился, а была произведена только идентификация диатомовых водорослей (Диатомовые водоросли СССР: ископаемые и современные, 1974).

Радиоуглеродное датирование 6 кернов из трех скважин проводилось в лаборатории США (National Ocean Sciences AMS Facility Department of Geology and Geophysics WoodsHole Oceanographic Institution, MA, USA) методом AMS, модель 1.5SDH-1 (<http://www.who.edu/nosams/ams-instruments>).

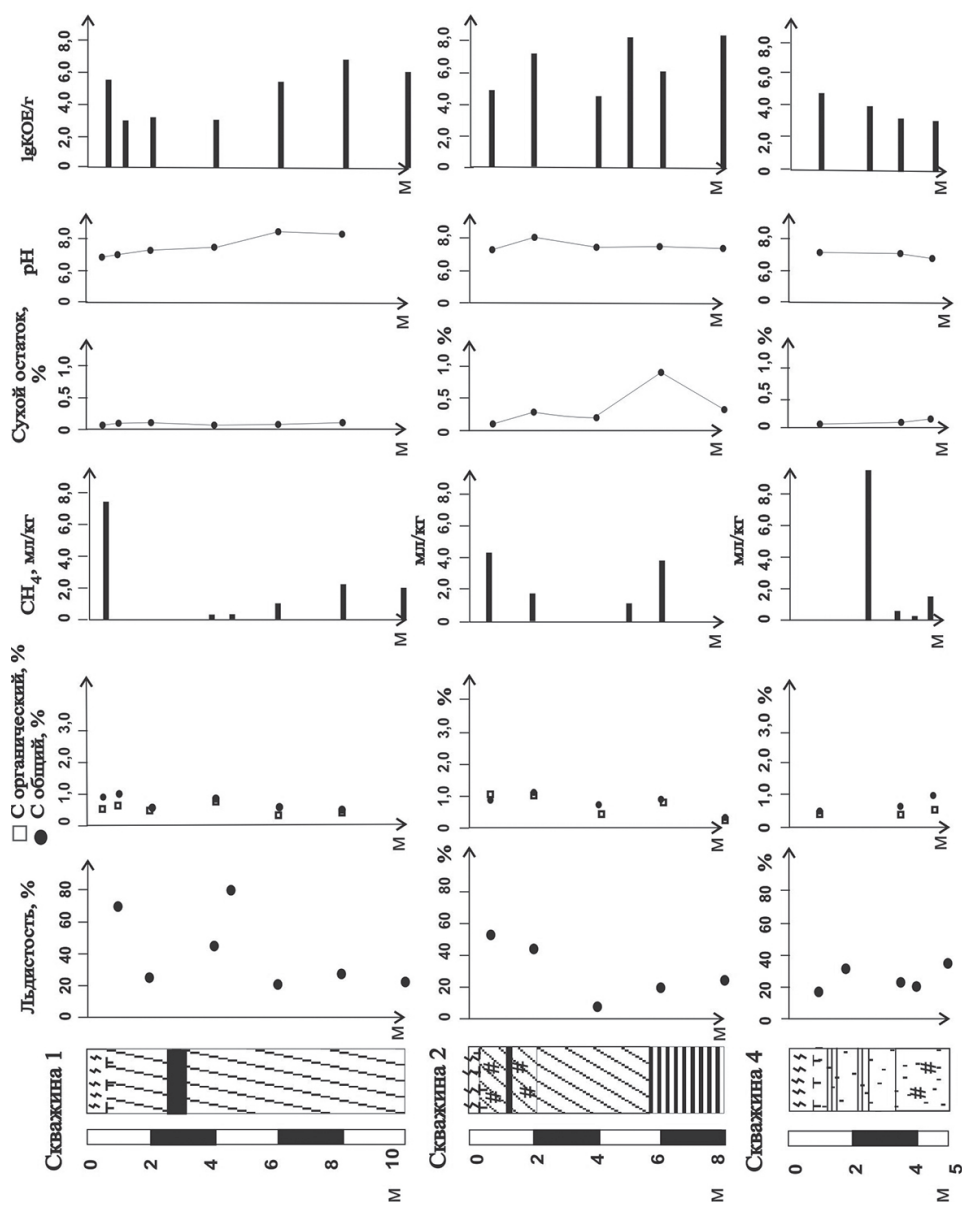
Определение количества колониеобразующих единиц (КОЕ) микроорганизмов проводили посевом на твердые питательные среды согласно (Звягинцев, 1991). В работе применяли стандартные питательные среды, используемые в лаборатории криологии почв Института физико-химических и биологических проблем почвоведения РАН для выделения микроорганизмов из многолетнемерзлых отложений: коммерческая порошковая среда R2A (Difco, США) — для олиготрофных микроорганизмов водных и обедненных органическим веществом природных экосистем; коммерческая порошковая среда TSB (Difco, США), предварительно разбавленная в соотношении 1:2, с добавлением 1,5 % бактоагара (Difco, США) — для выделения гетеротрофных микроорганизмов; голодный агар — для выделения олиготрофной почвенной микрофлоры. Посев производили в трехкратной повторности. Инкубацию засеянных чашек проводили при 4 и 20 °С в течение 4–8 недель.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Полуостров Явай, Обская губа

На изученном участке полуострова Явай выражена терраса высотой около 10 м, местами изрезанная термоэрозионными оврагами. В нее вложены термокарстовые озера (оз. Тиребято и др.) шириной до 500 м. Форма долин — *V*-образная, широкая пойма отсутствует. На поверхности террасы отчетливо выделяются мерзлотные полигоны.

В обнажениях берегового уступа вскрывается разрез с относительно выдержанными по простираанию геологическими границами (рис. 2а). Снизу вверх в береговых обрывах вскрываются три толщи. Нижняя толща включает параллельно-слоистые алевроиты, глины и хорошо отмытые пески с флазерной слоистостью и знаками



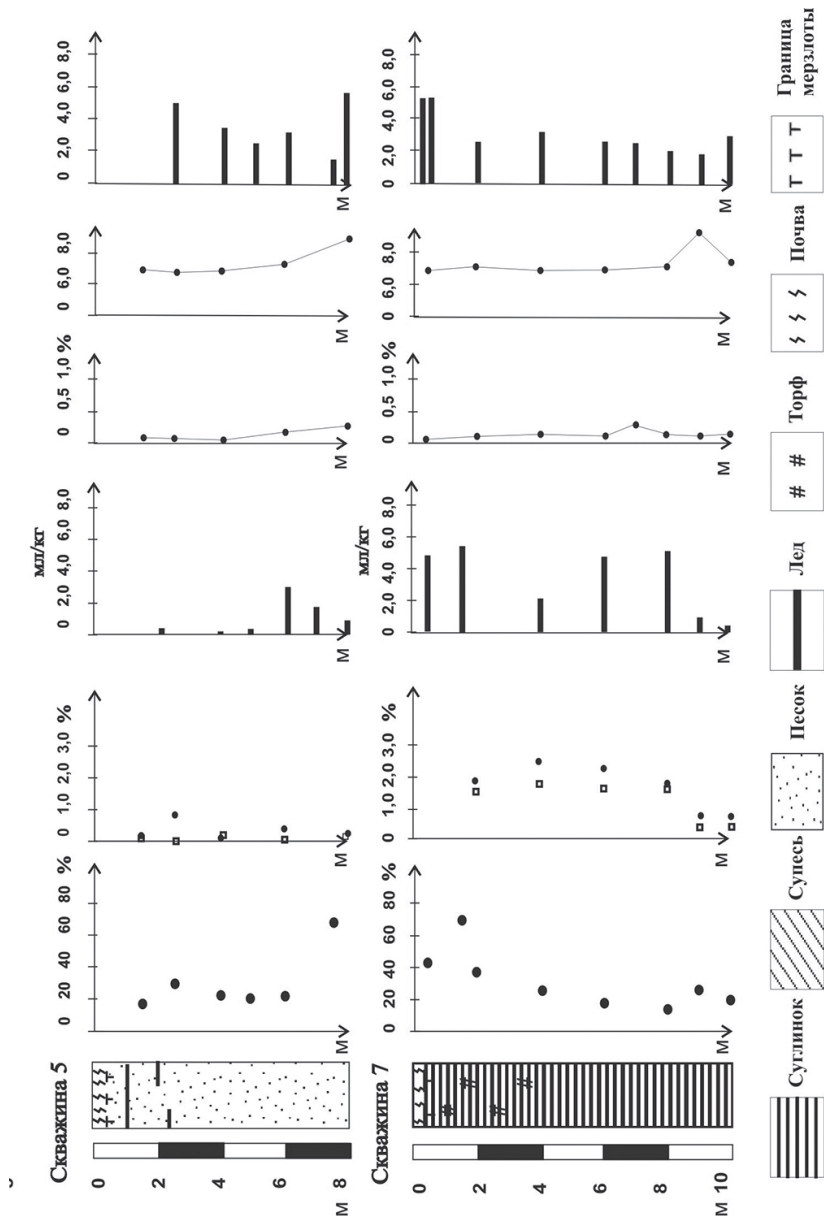


Рис. 3. Геологические колонки скважин 1, 2, 4, 5, 7 и результаты биохимических анализов.

ряби. Они фациально замещают друг друга вдоль по разрезу, подстилая повсеместно центральную толщу. Кровля толщи находится на высоте примерно от 3 до 7 м над уровнем моря, подошва залегает ниже уровня моря. Вышележащая центральная толща сложена пылеватыми супесями с горизонтальной параллельно-слоистой текстурой, в южном направлении замещаемыми на тонкозернистые пески. Она прослеживается в береговых обрывах на протяжении всего исследуемого участка (более 10 км). Кровля толщи поднимается на отметки до 10 м. Отличительная черта — отсутствие любых несогласий внутри толщи, отдельные слои возможно проследить по простиранию до 10 м. Мощность слоев составляет от 0,3 до 3 см. Местами наблюдается ожелезнение. Сверху и снизу центральная толща отделяется линзами слаборазложившегося торфа. Верхняя толща, имеющая мощность до 3 м и выклинивающаяся в южном направлении, состоит из переслаивающихся бурых супесей и суглинков. Для нее характерна параллельная слоистость, измененная криотурбацией.

Скважина 1 удалена от уступа террасы на 50 м. В районе скважины 1 высота террасы составляет около 8 м, глубина скважины 10 м, таким образом, скважина уходит на 2 м под урез моря. Разрез скважины (рис. 3) вскрывает центральную и нижнюю толщи. Мощность сезонно-талого слоя (СТС) в конце августа составила 0,6 м. Центральная толща имеет сетчатую криотекстуру, нижняя — массивную. Влажность центральной достигает 80 %, у нижней она составляет около 20 %. Толщи разделяются прослоем льда на глубине 2,6–3,2 м. На глубине 10 м температура составила $-7,4^{\circ}\text{C}$.

Анализ водной вытяжки показывает, что по составу ионов и сухому остатку верхняя и нижняя толщи практически не отличаются. Сухой остаток 0,03–0,08 %, тип засоления хлоридный и хлоридно-сульфатный. По классификации Н.Г. Минашиной (Минашина, 1970) отложения данной террасы являются слабозасоленными и незасоленными. рН водной вытяжки возрастает с глубиной от 6,8 до 8,3. В пяти из семи изученных образцов присутствовал метан в количестве от 0,9 до 7,0 мл/кг, в оставшихся двух на глубине 4 и 4,5 м его количество было близко к воздушному. Содержание органического углерода в скважине — 0,5–1 % (рис. 3).

На глубине 8 м единично, преимущественно в виде обломков, встречены следующие морские палеогеновые диатомеи: *Paralia sulcata* var. *siberica*, *P. sulcata* var. *crenulata*, *Stephanopyxis* sp. (cf. *marginulata*), *Hemiaulus* sp. и другие, установлены спикулы губок. Также обнаружены единичная створка ледово-морского вида *Dictiocha speculum* и единичные цисты золотистых пресноводных водорослей. На глубине 5,9–6,3 м встречены единичные обломки морских палеогеновых диатомей: *Paralia sulcata* var. *siberica*, *Stephanopyxis* sp. (cf. *marginulata*) и неопределимые обломки панцирей морских диатомей класса *Centricae*, установлены спикулы губок. На глубине 4 м единично, преимущественно в виде обломков, встречены следующие морские палеогеновые диатомеи: *Paralia sulcata* var. *siberica*, *Coscinodiscus payeri*, неопределимые обломки панцирей морских диатомей класса *Centricae*, установлены спикулы губок. В большей части образцов обнаружен детрит. Встречены остатки кустарников и мхов.

Радиоуглеродное датирование трех кернов из данной скважины выявило следующие возраста: 2 м – 8580 л, 6 м – 17 000 л, 10 м – 15 000 л.

Микробиологические анализы проводились с одним образцом из СТС и шестью мерзлыми кернами. Во всех из них были обнаружены жизнеспособные аэробные микроорганизмы в количестве 10^3 – 10^5 КОЕ/г породы.

Полуостров Мамонта, Гыданская губа

Побережье Гыданской губы на полуострове Мамонта, где проводились работы, в геоморфологическом отношении представлено высокой террасой высотой до 20 м, низкой террасой высотой до 8 м и лайдой высотой 0,5–2 м. Высокая терраса, образующая восточную часть исследуемой территории, обрывается к губе клифом. Низкая терраса не образует клифа и отделяется от моря лайдой.

Высокая терраса имеет сложное строение (рис. 2б): западная ее часть ближе к бухте Яйне-Вонга слагается крупными хорошо отмытыми параллельно-, косо- и волнистослоистыми песками с древесной щепой и углями. Восточнее они замещаются серыми параллельно-слоистыми глинами и пачками переслаивающихся ярко-сизых глин и тонких песков. Сверху терраса перекрыта покровными палевыми песками и бурыми суглинками мощностью до 4 м.

На полуострове Мамонта было пробурено 3 скважины, образующих профиль от моря в сторону берега: скважина 2 на лайде в 40 м от берега, скважина 3 в тыловом шве лайды и скважина 4 на низкой террасе. Устье скважины 2 на 1 м выше уровня моря, глубина скважины 8 м. Мощность СТС, сложенного талым серым оторфованным суглинком, в начале сентября составила 0,4 м. До глубины 2,1 м залегают супеси с прослоями торфа мощностью до 10 см. Криотекстура супесей слоистая, влажность 40–55 %. На глубине 1,2–1,3 м был встречен прослой льда. На глубине 2,1–5,7 м супесь с массивной криотекстурой влажностью менее 20 %, отмечается слоистость, мощность слоев 2–3 мм. Ниже до забоя залегает серый суглинок с сетчатой криотекстурой и влажностью около 25 %. По всей глубине керны имели запах органики и были солеными на вкус. Температура на забое скважины (8 м) составила –7 °С.

По величине сухого остатка водной вытяжки 0,06–0,9 % отложения, вскрытые данной скважиной, следует отнести к средне и очень сильно засоленным, тип засоления хлоридный. Значения рН водной вытяжки 7,4–8,0. Отложения содержат CH_4 в количестве 1,5–4 мл/кг и 0,3–0,6 % органического углерода. По результатам радиоуглеродного датирования возраст отложений: 17400 л. на 6 м и 11800 л. на 7,5 м.

На глубине 8 м встречены только немногочисленные обломки морских палеогеновых диатомей *Paralia sulcata* var. *siberica* и неопределимые обломки панцирей морских диатомей класса Centricae. На глубине 6 м встречены морские палеогеновые диатомеи, как целые панцири *Paralia sulcata* var. *siberica*, *P. sulcata* var. *crenulata*, *Stephanopyxis* sp. (cf. *marginulata*), так и обломки *Grunowiella gemmata* и неопределимые обломки панцирей морских диатомей класса Centricae, установлены спикулы губок. В этом образце установлено самое большое количество переотложенных палеогеновых диатомей из всех исследованных образцов. Также обнаружены единичные цисты золотистых пресноводных водорослей. На глубине 4 м встречены морские палеогеновые диатомеи, как целые панцири *Paralia sulcata* var. *siberica*, эбриидея *Parebriopsis symmetrica*, так и обломки морских палеогеновых диатомей *Grunowiella gemmata*, *Hemiaulus* sp., *Stephanopyxis* sp. (cf. *marginulata*), и неопределимые обломки панцирей морских диатомей класса Centricae, установлены спикулы губок. Также обнаружены единичные цисты (плохая сохранность) золотистых пресноводных водорослей. На глубине 2 м встречены морские палеогеновые диатомеи и неопределимые обломки панцирей морских диатомей класса Centricae, установлены спикулы губок. Также обнаружены единичные пресноводные диатомеи родов *Achnanthes* и *Pinnularia*, болотная пресноводная диатомея *Eunotia arcus* (единично), немногочисленные цисты

золотистых пресноводных водорослей, единичные чешуйки пресноводного планктонного голарктического вида *Synura sphagnicola* (Chrysophyta).

На глубине 0,7 м обнаружен очень богатый пресноводный бентосный диатомовый комплекс. Предварительно можно сказать, что он состоит из диатомовых родов *Navicula* (10 видов, в их числе *N. ignota*), *Nitzschia* (6 видов, в их числе *N. frustulum*), *Stauroneis* (6 видов, в их числе *S. venter*), *Pinnularia* (5 видов, в их числе *P. microstauron*), *Aulacoseira* (3 вида), *Caloneis* (2 вида), *Cymbella* (2 вида), *Eunotia* (2 вида: *E. arcus* и *E. praerupta*), *Luticula* (2 вида), *Stauroneis* (2 вида: *S. anceps* и *S. phoenicenteron*), *Denticula* (1 вид), *Epithemia* (1 вид — *E. turgida*), *Hantzschia* (1 вид — *H. amphioxys*), *Diploneis* (1 вид), *Neidium* (1 вид), *Amphora* (1 вид — *A. inariensis*), *Chamaepinnularia* (1 вид — *C. ignobilis*), многочисленные цисты золотистых пресноводных водорослей. Также обнаружены единичные створки морских палеогеновых диатомей, преимущественно в обломках.

В образцах обнаружены также фитолиты, пыльца, растительные ткани с клетками от мхов, грибов и кустарников, угли и детрит. Образец с забоя скважины оказался практически пустым.

Скважина 2 характеризуется наибольшим числом колониеобразующих единиц из всех скважин, а также неравномерным распределением микроорганизмов по глубине. Численность бактерий варьировала от 10^3 до 10^8 КОЕ на грамм породы.

Скважина 3 была пробурена в тыловом шве лайды с целью поиска криопэга в геофизическом пикете ВЭЗ, на котором была отмечена аномалия, потенциально связанная с наличием на глубине около 3 м осадков с незамерзшим рассолом. На глубине 3 м скважиной вскрыта линза криопэга. Криопэг имел напорный характер, глубина установившегося уровня 1,2 м. Отсутствие криопэга в скважине 2 и отсутствие аномалий в пикетах ВЭЗ вокруг нее позволили установить площадной размер линзы в 25×50 м. Разрез скважины аналогичен первым метрам разреза скважины 2.

Скважина 4 пробурена на низкой террасе, отделенной от моря лайдой. Высота террасы и глубина скважины 5 м. СТС имеет мощность 0,8 м и состоит из серого пылеватого суглинка с прослоями торфа мощностью до 2 см. До глубины 3,3 м залегают переслаивающиеся мелкие желтоватые пески с массивной криотекстурой и пылеватые оторфованные суглинки с сетчатой криотекстурой. С глубины 3,3 м скважиной были вскрыты желтовато-коричневые пески с субвертикальной неоднородностью с торфом и корешками, криотекстура массивная. Льдистость отложений 20–40%. По значениям сухого остатка 0,03–0,12% отложения незасоленные или слабозасоленные с трендом увеличения концентрации солей с глубиной, тип засоления хлоридный. Величина рН водной вытяжки изменяется в пределах от 6,7 до 7,1. Отложения содержат до 0,5% $C_{орг}$. Содержание метана было определено в 4 образцах, в двух из которых концентрация метана была близка к 0, а в двух других 1,5 и 9,0 мл/кг.

На глубине 4–4,5 м обнаружены единичные пресноводные диатомовые: болотный вид *Eunotia praerupta*, аэрофильный вид *Hantzschia amphioxys* (космополитный вид, убиквист, который встречается как в бентосе пресных водоемов разного типа, так и на мхах, и во влажной почве). Также встречены единичные обломки панцирей морских диатомей класса Centricae. На глубине 3,5 м обнаружены единичные пресноводные диатомовые (*Hantzschia amphioxys* и др.). Также встречены единичные обломки панцирей морских диатомей класса Centricae. Обнаружена створка морского вида *Thalassiosira hyalina*. На глубине 1 м встречены единичные морские палеогеновые диатомей и неопределимые обломки панцирей морских диатомей класса Centricae,

установлены спикулы губок. Обнаружены обломки пресноводных диатомей: болотного *Eunotia praeurpta* и аэрофильного *Pinnularia borealis*.

В кернах скважины 4 обнаружены единичные фитолиты, пыльца. Также обнаружены растительные ткани осок, злаков, кустарников и мхов, остатки грибов, а также детрит. В целом содержание микробиоморф очень низкое. Радиоуглеродный возраст отложений на глубине 4,0 м составляет 34300 лет.

Количество колониеобразующих единиц уменьшалось с глубиной от 10^5 до 10^3 КОЕ/г породы.

Мыс Хонарасаля, Обская губа

Исследованный район в геоморфологическом отношении состоит из двух хорошо выраженных уровней: поймы высотой до 2 м в устьевой зоне р. Нгарка-Хортяха и распространенной к северу от нее террасы высотой до 28 м, обрывающейся к морю клифом. В обнажениях берегового уступа общей длиной 6 км, изученного в ходе полевых работ, вскрывается следующая последовательность (рис. 2б): в основании залегают бурые и сизые слоистые глины, переслаивающиеся средним и мелким песком, в котором многочисленны остатки щепы и веток, выше по разрезу в данную толщу вложены пачки крупных слоистых песков и пачки неслоистых глин с щебнем, а также переслаивающихся мелких песков с косой слоистостью и суглинков.

Скважина 5, расположенная в пойме р. Нгарка-Хортяха в 800 м от устья и в 100 м от ее берега, вскрывает аллювиальные отложения и нижнюю глинистую пачку террасы (рис. 3). Мощность СТС в середине сентября составила 0,3 м; имеются морозобойные полигоны с ледяными жилами мощностью около 10 см. Разрез сложен мелким песком с прослоями органического материала и в верхней части с включениями древесных остатков. До глубины в 6 м отмечается косая слоистость. В диапазоне глубин от 1 до 2,3 м вскрыты пояски льда мощностью до 4 см, в остальной части разреза криотекстура массивная. Характерные значения влажности 20–30 %. Тип засоления хлоридный. По величине сухого остатка отложения разбиваются на две пачки: верхняя — до глубины в 6 м незасоленная (сухой остаток 0,02–0,04 %), нижняя слабо-среднезасоленная (сухой остаток 0,08–0,22 %). Такое разбиение подтверждается анализами метана, который практически отсутствует в верхней пачке, а в нижней содержится в количестве 0,8–3,5 мл/кг. Содержание органического углерода в обеих пачках составляет 0,1–0,2 %. Пачки различаются по значениям рН водной вытяжки: в верхней пачке рН колеблется от 6,7 до 6,9, в нижней — от 7,3 до 8,3.

На глубине 8 м встречены только немногочисленные обломки морских палеогеновых диатомей и неопределимые обломки панцирей морских диатомей класса Centricae. На глубине 6 м обнаружен пресноводный диатомовый комплекс, предварительно — преобладают бентосные диатомей *Pinnularia viridis*, встречены *Epithemia turgida*, северо-альпийский вид *Tetracyclus lacustris*, *Surirella crumena* и др., цисты золотистых пресноводных водорослей. Обнаружены немногочисленные целые панцири морских палеогеновых диатомей *Paralia sulcata* var. *siberica* и неопределимые обломки панцирей морских диатомей класса Centricae.

На глубине 4 м обнаружены единичные пресноводные бентосные диатомей *Pinnularia viridis*, цисты золотистых пресноводных водорослей. Обнаружены единичные целые панцири морских палеогеновых диатомей и неопределимые обломки панцирей морских диатомей класса Centricae. На глубине 2 м обнаружен пресновод-

ный диатомовый комплекс, предварительно — преобладают бентосные болотные диатомеи *Eunotia arcus* и *Eunotia praeurupta*, встречены *Pinnularia viridis*, *P. borealis*, *P. microstauron* и др., цисты золотистых пресноводных водорослей. Обнаружены единичные целые панцири морских палеогеновых диатомей *Paralia sulcata* var. *siberica* и неопределимые обломки панцирей морских диатомей класса Centricae.

На глубине 1–1,5 м обнаружен обедненный пресноводный диатомовый комплекс, встречены *Pinnularia viridis*, *P. borealis*, *Nitzschia perminuta*, *Cymbella* sp., *Gomphonema* sp. и др., цисты золотистых пресноводных водорослей. Обнаружены единичные целые панцири морских палеогеновых диатомей и неопределимые обломки панцирей морских диатомей класса Centricae, единично — эбриидея *Parebriopsis symmetrica*.

В образцах из скважины 5 обнаружены фитолиты, а также заносная пыльца, детрит. Из растительных останков с клетками — мхи, злаки и хвойные. Исключение составляют низы скважины, оказавшиеся пустыми на данные микробиоморфы.

Количество колониеобразующих единиц уменьшалось с глубиной от 10^5 до 10^2 – 10^3 КОЕ/г породы.

Устье реки Монгочехя, Енисейский залив

Рельеф района побережья Енисейского залива от устья реки Монгочехя до устья реки Омuleвая представлен двумя разновысотными поверхностями: высокой террасой и лайдой. Терраса высотой до 30 м обрывается к берегу клифом. Поверхность террасы ровная, слабо расчлененная; полигональная сеть выражена слабо. Байджарахи практически отсутствуют. В береговом уступе вскрывается толща чередующихся слоев песка и темно-сизых глин (рис. 2з). Слои имеют мощность до 1,5 м. Песок крупный и средний с большим количеством древесной щепы, характеризуется волнистой слоистостью. Данный ритм образует своеобразную антиклиналь с углом падения крыльев около 1° . В западной оконечности берегового уступа, на которой пробурена скважина 7, ритм замещается толщей оторфованных серо-коричневых суглинков. Граница между ними несогласная, глины выклиниваются в восточном направлении. С запада береговой уступ отделяется одной из протоков реки Монгочехя от лайды высотой до 1 м, где расположена скважина 6.

Скважина 6 была пробурена на лайде в 60 м от берега с целью поиска криопэга в районе геофизического пикета ВЭЗ, на котором была отмечена аномалия кажущегося сопротивления. Мощность СТС, сложенного средним незасоленным желтоватым песком с включениями корней растений, составила 1,1 м. Ниже до глубины около 3 м залегают мерзлые пески и супеси с массивной криотекстурой. В диапазоне глубин 3–5 м был вскрыт криопэг. По количеству сухого остатка отложения классифицируются как очень сильно засоленные (1,8–1,9%). рН водной вытяжки 6,5–7,8. Количество $C_{орг}$ достигают 1,3%.

В скважине 6 на глубине 4,5 м обнаружен солоноватоводный диатомовый комплекс с преобладанием *Nitzschia tryblionella* (пресноводно-солоноватоводный вид, некоторые авторы рассматривают его как лагунный вид на морских побережьях). На глубине 2 м обнаружены солоноватоводные и солоноватоводно-морские диатомеи в незначительном количестве: *Diploneis smithii*, *Nitzschia tryblionella*. Обнаружены единичные целые панцири морских палеогеновых диатомей *Paralia sulcata* var. *siberica* и неопределимые обломки панцирей морских диатомей класса Centricae. На глубине 1,2 м обнаружен диатомовый комплекс, возможно, монодоминантный, представленный преобладающим диатомовым видом *Pinnularia bottnica* — это пресноводный

вид, который может обитать в слабо солоноватых водах. В образцах из скважины 6 обнаружено максимальное из всех проанализированных образцов разнообразие фитолитов и пыльцы. Здесь также выявлены детрит, угли, остатки с тканями хвойных и кустарников.

Скважина 7 глубиной 10 м (рис. 3) пробурена на террасе высотой около 3 м в 25 м от стенки. Поверхность террасы в районе скважины разбита сетью морозобойных полигонов. СТС мощностью 30 см представлен оторфованным коричневым суглинком. Ниже до 4 м залегают льдистые серо-коричневые суглинки со слоистой и сетчатой криотекстурой и влажностью от 20 до 70 %, в отдельных прослоях — ледогрунт. С глубины около 4 м суглинки имеют массивную криотекстуру и льдистость около 20 %. Скважиной вскрыто значительное количество оторфованных прослоев и редкие включения корней. Верхняя пачка незасоленная (сухой остаток 0,02–0,05 %), нижняя пачка (с 8 до 10 м) характеризуется средней степенью засоленности (сухой остаток до 0,16 %). Тип засоления хлоридный и хлоридно-сульфатный. Одновременно пачки различаются и по значениям pH водной вытяжки: в верхней пачке pH около 7, в нижней до 9,3. Концентрация метана уменьшается с глубиной от 5,2 мл/кг на 0,5 м, до 0,4 мл/кг на 10 м. Отложения содержат высокие, по сравнению с другими исследованными нами образцами, концентрации $C_{\text{орг}}$ — от 2 до 5 %.

На глубине 10 м диатомовых водорослей не обнаружено. На глубине 8–9 м встречены единичные морские палеогеновые диатомеи, как целые панцири *Paralia sulcata* var. *siberica*, так и неопределимые обломки панцирей морских диатомей класса Centricae. Также обнаружен обломок морской планктонной диатомеи *Thalassiosira gravida*. Встречены «единично» цисты золотистых пресноводных водорослей. На глубине 8 м обнаружены только маленькие по величине обломки панцирей морских диатомей класса Centricae. На глубине 6 м установлены преимущественно в обломочном состоянии створки пресноводных диатомей: *Hantzschia amphioxys*, *Pinnularia borealis*, *Stauroneis phoenicenteron*, *Eunotia praeurupta* — и обломки панцирей пресноводных пеннатных диатомей. Обнаружены единичные цисты золотистых пресноводных водорослей. Обломками представлены морские палеогеновые диатомеи *Paralia sulcata* var. *siberica* и другие центрические. На глубине 4 м также немногочисленные створки пресноводных диатомей плохой сохранности представлены: *Eunotia arcus*, *E. praeurupta*, *Hantzschia amphioxys*, *Navicula amphibola* (пресноводный редкий холодолюбивый вид), *Pinnularia borealis*, *Pinnularia viridis*, цисты золотистых пресноводных водорослей. Обнаружены обломки створок морских палеогеновых диатомей *Paralia sulcata* var. *siberica*, *P. sulcata* var. *crenulata*, *Coscinodiscus payerii* и другие центрические.

В образцах с глубины 9 и 10 м обнаружены детрит и угли, вышележащие образцы содержат также остатки хвойных, кустарников, злаков и мхов.

Число колониеобразующих единиц убывает с глубиной от 10^5 до менее 10^2 КОЕ/г породы.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ И ВЫВОДЫ

Проведенные исследования позволяют сделать ряд предварительных выводов, связанных с биогеохимической характеристикой и условиями формирования мерзлых пород арктического побережья Гыдана, которые необходимо будет уточнять в процессе дальнейших исследований.

Метан. Содержания метана и закономерности его распределения в мерзлых толщах Гыдана в целом согласуются с данными, полученными ранее на приморских

низменностях Якутии (Rivkina et al., 2007) и на Ямале (Васильев и др., 2015). Этот факт интересен тем, что полуостров Гыдан, как и Ямал, приурочен к Западно-Сибирской нефтегазоносной провинции, в то время как на севере Якутии месторождения углеводородов не обнаружены. Таким образом, еще раз подтверждается сделанный на основе определения изотопного анализа метана (Ривкина и др., 2006, Rivkina et al., 2007, Васильев др., 2015) вывод о том, что метан в мерзлых дисперсных породах есть продукт биогенного процесса, осуществляемого метанобразующими археями в строго анаэробных условиях *in situ*, а не результат диффузии катагенетического глубинного метана из недр. При сходных средних по всем образцам концентрациях метана на Гыдане (~2 мл/кг) и на севере Якутии, ни в одном из гыданских образцов концентрация CH_4 не превысила 10 мл/кг. На приморских низменностях Якутии достаточно часто концентрация CH_4 составляла десятки мл/кг. Скважина 5, пробуренная в долине р. Нгарка-Хортяха, показала отсутствие метана в аллювиальных отложениях, что также характерно для аллювия Якутии и западного Ямала.

Органический углерод. Корреляция содержания метана и $\text{C}_{\text{орг}}$, выявленная ранее на образцах мерзлых пород с западного Ямала, яркого подтверждения в результатах с Гыдана не имеет, за исключением скважины 7, которая одновременно характеризуется высокими значениями CH_4 и $\text{C}_{\text{орг}}$. Содержание общего углерода, усредненное по всем образцам, составило около 0,7%, что меньше среднего содержания общего углерода в кайнозойских мерзлых породах различного генезиса на севере Якутии 1,0–2,2% (Шмелев и др., 2013). Содержание органического углерода примерно на 20% ниже $\text{C}_{\text{общ}}$, что, очевидно, связано с наличием в исследованных отложениях карбонатов. Значения $\text{C}_{\text{орг}}$ хорошо согласуются с результатами определения органического углерода в мерзлых породах западного Ямала, которые показали, что супесчано-суглинистые отложения содержат в среднем 0,34%, а суглинистые и глины 0,84% органического углерода (Васильев и др., 2015).

Водная вытяжка. По величине сухого остатка исследованные породы варьируют от слабо- до сильнозасоленных, что может отражать как степень морского влияния на генезис отложений, так и последующие процессы вымывания солей. Максимальная засоленность наблюдалась в отложениях лайды, где сухой остаток составил 0,18–1,96%. Такие значения сухого остатка можно считать индикатором слабопромывтых морских осадков. Аллювиальная пачка в скважине 5 не засолена и может, напротив, указывать на то, что осадки генетически не связаны с морем. К аналогичным отложениям следует отнести мерзлые породы, вскрытые скважиной 1, и верхнюю пачку в скважине 7. Остальные исследованные отложения либо образовались в условиях смешивания морских и пресных вод, либо представляют собой промытые осадки.

Данные по засоленности хорошо согласуются с данными измерения pH водной вытяжки. Как известно, морская вода вблизи арктического побережья характеризуется слабощелочной реакцией pH 7,98–8,49 (Rérollea et al., 2016). Морские осадки современной лайды в наших исследованиях характеризовались значениями pH 7,1–9,3. Величина pH аллювиальной пачки в скважине 5 была 6,7–7,3. pH 6,7–7,1 наблюдались в скважине 4. Пачки, слагающие низы скважин 5 и 7, которые интерпретируются нами как морские отложения, отличаются от вышележащих более высокими значениями pH. В целом, исходя из анализа полученных данных, пресноводные отложения характеризуются относительно более низкими значениями pH, чем отложения морского генезиса.

Генезис отложений. Генетическую принадлежность некоторых исследованных толщ однозначно можно определить исходя из их геоморфологического положения. Так, скважины 2, 3 и 6 вскрывают осадки лайды МИС 1 – МИС 2, что находит свое отражение в их высокой солености и высоких значениях рН. Скважина 5, расположенная в пойме реки, на глубину до 6 м вскрывает аллювиальные отложения, вероятно, сингенетически промерзшие. Это подтверждается наличием косой слоистости, отсутствием засоления, метана, низким рН и наличием пресноводных диатомовых. Отсутствие косой слоистости и микробиоморф, повышенная соленость, высокие значения рН и метана позволяют проинтерпретировать нижнюю часть скважины 5 как морские осадки, вероятно, эпигенетически промерзшие.

Вопрос о генетической приуроченности отложений, вскрытых скважинами 1, 4 и 7, более сложный. Все они слагают террасы, которые теоретически могут быть сложены как морскими, так и аллювиальными, озерно-болотными и эоловыми отложениями. Отложения в скважине 1, вероятно, образовались в озере или сильно распресненной лагуне, о чем свидетельствует параллельная слоистость супесей, отсутствие засоления, низкий рН. Осадконакопление согласно радиоуглеродному датированию происходило на протяжении МИС 1 – МИС 2. Генезис отложений МИС 3, вскрытых скважиной 4, остается спорным. Согласно данным микробиоморфного анализа они образованы в условиях незатопленной поверхности с кустарниково-разнотравными растительными группировками с участием разнообразных зеленых мхов в напочвенном покрове. Обнаружение панцирей пресноводных и переотложенных морских диатомовых говорит о том, что осадки образованы в условиях смешивания морских и пресных вод, например на периодически затапливаемой поверхности лайды. Однако диатомовые обнаружены в очень малом количестве, что не позволяет однозначно говорить, что они захоронены *in situ*.

В скважине 7 нижняя пачка, вероятно, образована в морских условиях, о чем свидетельствуют суглинистый состав, отсутствие микробиоморфов, высокий рН и зарегистрированное повышение солености в этой скважине с глубиной. Предполагаемый генезис верхней пачки — озерный. В пользу такого образования говорит суглинистый состав с большим количеством оторфованных горизонтов, наличие пресноводных диатомовых, отсутствие засоления, большие концентрации метана и прослеживающееся в береговом уступе линзообразное выклинивание данной пачки.

Микробиология. Численность микроорганизмов, определенная в мерзлых отложениях, была на 2–3 порядка ниже, чем в многолетнемерзлых отложениях из приморских низменностей Якутии, что может свидетельствовать о менее благоприятных условиях для сохранения жизнеспособности психрофильно-психротрофными микроорганизмами. Значения численности микроорганизмов в образцах СТС также были существенно ниже (10^4 – 10^5 КОЕ/г породы) по сравнению с приморскими низменностями Якутии (10^8 КОЕ/г породы) (Спирина, Федоров-Давыдов, 1998). Это может быть связано с тем, что исследованные отложения на Гыдане находятся в условиях более высоких среднегодовых температур. Помимо этого, они характеризуются относительно большим содержанием крупной фракции в гранулометрическом составе и более низким содержанием органического углерода. Все эти факторы в совокупности, очевидно, не способствовали как изначально большому представительству микроорганизмов в осадках, так и их длительному сохранению в условиях мерзлоты. Тем не менее тот факт, что изученные скважины находятся на территории нефте- и газоносной провинции, позволяет надеяться в дальнейшем выявить среди

изученных микроорганизмов представителей, способных к деструкции органических контаминантов, таких, как фенолы, нефть и нефтепродукты, формальдегиды и полиароматические углеводороды.

Полевые работы выполнены в рамках экспедиции «Ямал – Арктика 2013», лабораторные работы выполнены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (РФФИ), гранты № 15-04-07772, 16-45-890076 p_a, 16-35-60118 мол_a_дк, 16-35-00453 мол_a.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Ариунукина Е.В.* Руководство по химическому анализу почв. М: МГУ, 1970. 487 с.
- Васильев А.С., Стрелецкая И.Д., Мельников В.П., Облогов Г.Е.* Метан в подземных льдах и мерзлых четвертичных отложениях западного Ямала // Доклады Академии наук. 2015. Т. 465. № 5. С. 604–607.
- Гиличинский Д.А., Хлебникова Г.М., Звягинцев Д.Г. и др.* Микробиологические характеристики при изучении осадочных пород криолитозоны // Известия АН СССР. Серия геологическая. 1989. № 6. С. 114–126.
- Гольева А.А.* Микробиоморфные комплексы природных и антропогенных ландшафтов. Генезис, география, информационная роль. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. 240 с.
- Диатомовые водоросли СССР: ископаемые и современные. Т. 1. Л.: Наука, 1974. 403 с.
- Звягинцев Д.Г.* Методы почвенной микробиологии и биохимии. М.: МГУ, 1991. 304 с.
- Минашина Н.Г.* Токсичные соли в почвенном растворе, их расчет и классификация почв по степени засоления // Почвоведение. 1970. № 8. С. 92–105.
- Ривкина Е.М., Краев Г.Н., Кривушин К.В., Лауринавичюс К.С., Федоров-Давыдов Д.Г., Холодов А.Л., Щербакова В.А., Гиличинский Д.А.* Метан в вечномёрзлых отложениях северо-восточного сектора Арктики // Криосфера Земли. 2006. Т. 10. № 3. С. 23–41.
- Спирина Е.В., Федоров-Давыдов Д.Г.* Микробиологическая характеристика мерзлотных почв Колымской низменности // Почвоведение. 1998. № 12. С. 1462–1475.
- Шмелев Д.Г., Краев Г.Н., Веремеева А.А., Ривкина Е.М.* Содержание углерода в мерзлых отложениях северо-востока Якутии // Криосфера Земли. 2013. Т. 17. № 3. С. 50–59.
- Alperin M.J., Reeburgh W.S.* Inhibition experiments on anaerobic methane oxidation // Applied and Environmental Microbiology. 1985. Vol. 50. № 4. P. 940–945.
- Gilichinsky D.A., Wagener S., Vishnevetskaya T.A.* Permafrost microbiology // Permafrost and Pereglaclar Processes. 1995. Vol. 6. № 4. P. 281–291.
- Price P.B., Sowers T.* Temperature dependence of metabolic rates for microbial growth, maintenance, and survival // Proceedings of the National Academy of Sciences. 2004. Vol. 101. № 13. P. 4631–4636.
- Rérolle V., Ruiz-Pino D., Rafizadeh M., Soucaides S., Papadimitriou S., Mowlem M., Chen J.* Measuring pH in the Arctic Ocean: Colorimetric method or SeaFET? // Methods in Oceanography. 2016. Vol. 17. P. 32–49.
- Rivkina E.M., Shcherbakova V.A., Laurinavichius K.V., Petrovskaya L.E., Krivushin K.V., Kraev G.N., Pecheritsina S.A., Gilichinsky D.A.* Biogeochemistry of methane and methanogenic archaea in permafrost // FEMS Microbiology Ecology. 2007. Vol. 61. P. 1–15.
- Steven B., Briggs G., McKay Ch.P., Pollard W.H., Greer C.W., Whyte L.G.* Characterization of the microbial diversity in permafrost sample from the Canadian high Arctic using culture-dependent and culture-independent methods // FEMS Microbiology Ecology. 2007. Vol. 59. № 2. P. 513–523.
- Vorobyova E.A., Soina V.S., Gorlenko M., Minkovskaya N., Zalinova N., Mamukelashvili A., Gilichinsky D.A., Rivkina E.M., Vishnevetskaya T.A.* The deep cold biosphere: facts and hypothesis // FEMS Microbiological Reviews. 1997. № 20. P. 277–290.

*N.E. DEMIDOV, A.V. BARANSKAYA, E.V. DURDENKO, E.S. KARAEVSKAYA, Z.V. PUSHINA,
E.M. RIVKINA, E.V. SPIRINA, R. SPENSER*

**BIOGEOCHEMISTRY OF PERMANENTLY FROZEN DEPOSITS
ON THE ARCTIC SHORE OF GYDAN PENINSULA**

Core drilling was performed in four regions of arctic shore on Gydan peninsula. Complex laboratory analysis of cores allowed to characterize biochemistry of Gydan permafrost. These results are compared with data from other permafrost provinces and are applied for paleoreconstructions.

Keywords: Gydan peninsula, methane in permafrost, microorganisms in permafrost, carbon in permafrost.