

УДК 624.131.3

М.Ю. Чербунина<sup>1</sup>, Д.Г. Шмелев<sup>2</sup>, А.В. Брушков<sup>3</sup>, В.С. Казанцев<sup>4</sup>, Р.Н. Аргунов<sup>5</sup>**ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ МЕТАНА В ВЕРХНИХ ГОРИЗОНТАХ МНОГОЛЕТНЕМЕРЗЛЫХ ПОРОД ЦЕНТРАЛЬНОЙ ЯКУТИИ<sup>6</sup>**

Представлены результаты многолетних полевых исследований содержания метана в верхней части многолетнемерзлых пород для различных геоморфологических уровней Центральной Якутии. Установлены основные закономерности распределения в зависимости от ландшафтных и мерзлотно-геологических условий. Для межаласных участков выявлена разница в содержании метана в отложениях позднеплейстоценового ледового комплекса на левом и правом берегах р. Лена, обусловленная различными условиями формирования — на левом берегу образование маломощного покрова отложений проходило в субаквальных условиях, благоприятных для метаногенеза, на правом — в более сухих аэробных условиях. Максимальные значения концентрации метана приурочены к аласным отложениям, где определяющим являются момент и продолжительность промерзания пород после спуска термокарстового озера в субаэральные условия. Содержание метана отличается большой изменчивостью по глубине и в плане в рассмотренных отложениях, при этом после промерзания не наблюдается его перераспределение, что позволяет использовать метан как палеоиндикатор условий накопления и промерзания отложений.

*Ключевые слова:* концентрация метана, ледовый комплекс, аласы, Центральная Якутия.

The article presents the results of long-term field studies of methane in the upper part of permafrost for the different geomorphological levels of Central Yakutia. Patterns of spatial distribution of methane content across different landscapes were found. The highest concentrations of methane are found in alas deposits, the major role of methane in the conservation there goes to the moment of freezing the thermokarst lake draining. The difference in methane content in the sediments of the Late Pleistocene Ice Complex on the left and the right bank of the river Lena was identified. That is likely caused by the conditions of ice complex formation.

*Key words:* methane concentrations, permafrost thawing, ice complex, alases, Central Yakutia.

**Введение.** Метан (CH<sub>4</sub>) — один из основных парниковых газов, его концентрация в атмосфере возросла в 2,5 раза от 722 ppm в 1750 г. до 1803 ppm в 2011 г. [IPCC, 2014]. Исследования [Ривкина и др., 2006; Brouchkov и др., 2002; Васильев и др., 2015; Vooreboom et al., 2013] показывают, что, занимая около 25% площади в Северном полушарии, вечная мерзлота содержит в себе большое количество метана.

В последние десятилетия тренд потепления наиболее сильно выражен в северных широтах, где он в 2 раза превышает средние значения по планете. На территории России наибольшее потепление фиксируется в Центральной Якутии — до 0,06 °С/год, а тренд увеличения температуры мерзлых грунтов при этом составляет более 0,03 °С/год [Павлов, Малкова, 2009]. Увеличение температуры

воздуха провоцирует деградацию вечной мерзлоты и может приводить к увеличению глубины сезонного протаивания, развитию термокарста по льдистым отложениям, термоэрозии, термоабразии, термоденудации. В результате оттаивания и разрушения мерзлых отложений переотлагается органика, она используется метанообразующими бактериями для генерации CH<sub>4</sub>, который поступает в воздух [Schuur et al., 2015].

Цель работы — определение запасов метана в верхней части мерзлых пород, наиболее подверженных деградации при потеплении климата, на разных геоморфологических уровнях в Центральной Якутии.

**Методика исследований.** Отбор образцов мерзлых пород осуществлялся с помощью колонкового кернового бурения (мотобуром или установкой

<sup>1</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, вед. инж.; *e-mail:* cherbuninamariya@gmail.com

<sup>2</sup> ОАО «Гипротрубопровод», отдел инженерной защиты, гл. специалист; *e-mail:* denwallace@yandex.ru

<sup>3</sup> Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, геологический факультет, кафедра геокриологии, заведующий кафедрой, докт. геол.-минерал. н.; *e-mail:* brushkov@geol.msu.ru

<sup>4</sup> Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, лаборатория математической экологии, науч. с.; *e-mail:* kazantsev@ifaran.ru

<sup>5</sup> Институт мерзлотоведения СО РАН, лаборатория криогенных ландшафтов, вед. инженер; *e-mail:* argunov@mpi.ysn.ru

<sup>6</sup> Исследование выполнено за счет гранта РФФИ (проект № 16-35-00403\_мол\_а).

УКБ-12/25) или непосредственно из обнажений. При работе на обнажениях образцы вырубали из мерзлой стенки топором или выпиливали бензопилой на расстоянии от поверхности стенки не менее 0,4–0,5 м. Сбор газа из мерзлых образцов проводился следующим способом [Arkhangelov, Novgorodova, 1991]: мерзлые образцы массой 1–3 кг помещали в емкость, полностью заполненную концентрированным раствором NaCl, и накрывали воронкой с подсоединенной газосборной колбой. Система целиком заполнена раствором NaCl. При таянии образца и дегазации выделяющиеся пузыри газа поднимаются через воронку и трубку в газосборную колбу, лишняя жидкость из колбы по другой трубке вытесняется обратно в емкость (рис. 1). Таким образом проводится сбор всего объема газа, содержащегося в образце, который собирается через систему шприцов в флаконы объемом 10–20 мл, заполненные также раствором NaCl путем вытеснения этого раствора. Затем флаконы в перевернутом положении транспортируются в лабораторию.

Концентрацию метана определяли методом газовой хроматографии на приборе «Хроматэк-Кристалл 5000.2» с пламенно-ионизационным де-

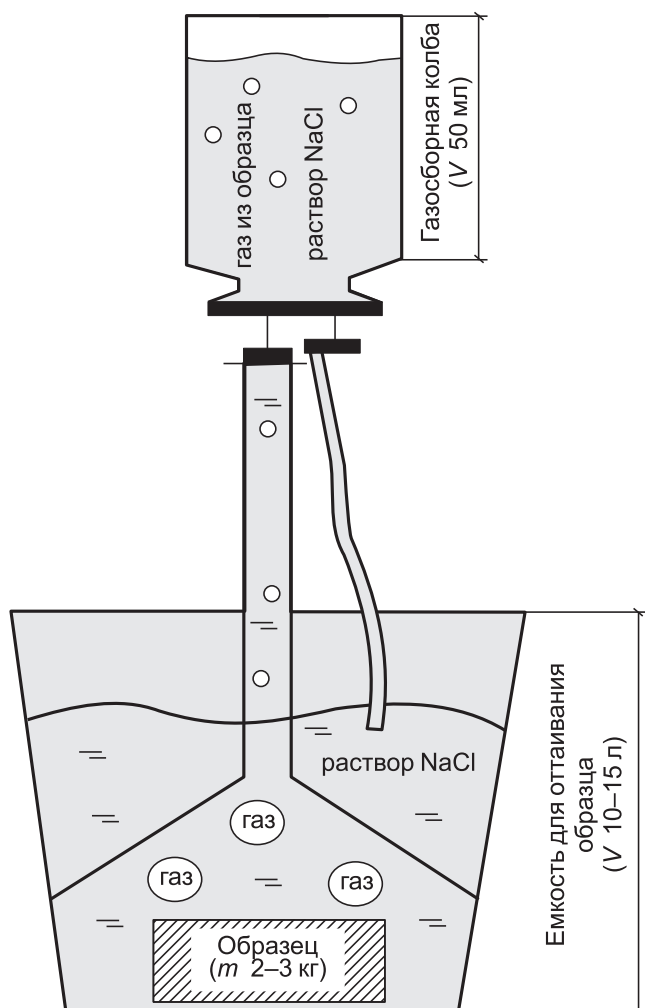


Рис. 1. Схема дегазации образцов мерзлых пород. Вне масштаба

тектором в лаборатории математической экологии Института физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН. Определение концентрации метана в каждой пробе проводили с трехкратной повторностью.

Кроме того, для отобранных мерзлых образцов пород стандартными методами определяли: водородный потенциал (рН), минерализацию и состав водорастворимых солей в жильных льдах и вмещающих их отложениях — титриметрически и потенциометрически на геологическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова на кафедре геохимии; содержание органического углерода отложений — по бихроматной окисляемости методом И.В. Тюрина в модификации Б.А. Никитина (сушильный шкаф), а также и Д.С. Орлова и Н.М. Гриндель (двухлучевая спектрофотометрия) на географическом факультете МГУ имени М.В. Ломоносова на кафедре геохимии ландшафтов и географии почв.

**Результаты исследований и их обсуждение.** Содержание метана в мерзлых породах и их свойства исследованы на 4 природных полигонах: стационары Нелегер и Юкэчи, алас Сырдах и 1-я надпойменная терраса (1 н.п.) терраса левого берега р. Лена (рис. 2). На площадках охарактеризованы следующие типы отложений Центральной Якутии: песчаные синкриогенные аллювиальные отложения террас долины р. Лена, межаласные и аласные отложения маганской террасы левого берега Лены (стационар Нелегер), межаласные и

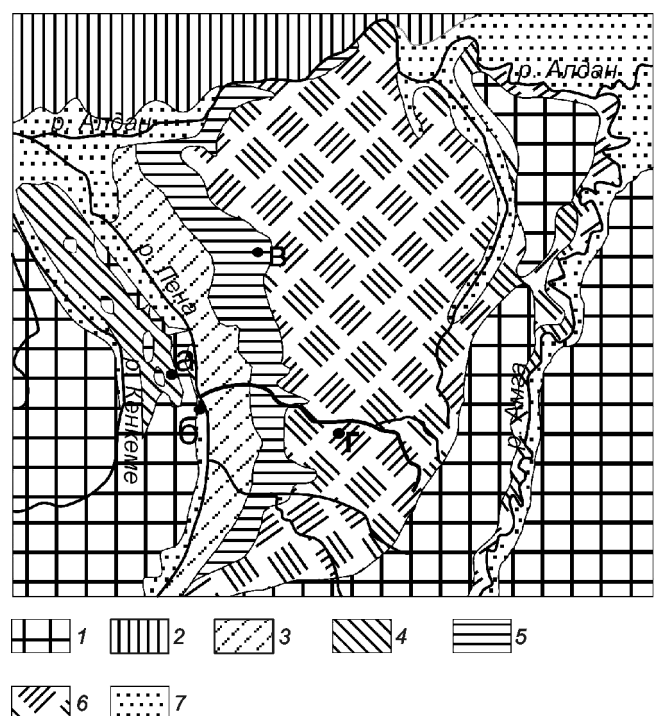


Рис. 2. Схема расположения исследованных участков (буквы) на различных геоморфологических уровнях (цифры): а — Нелегер; б — Якутск; в — Сырдах; г — Юкэчи. 1 — денудационная поверхность, 2 — ледниковая равнина, 3 — бестяхская терраса, 4 — маганская терраса, 5 — тынгулюнская терраса, 6 — абалахская терраса, 7 — долины рек. Схема составлена на основании геоморфологических карт [Иванова, 1984; Соловьев, 1959]

аласные отложения абалахской террасы правого берега р. Лена (стационар Юкэчи), межаласные отложения тюнгилюнской террасы правого берега р. Лена (район аласа Сырдах).

**Район аласа Сырдах** расположен на правом берегу Лены в ее среднем течении на тюнгилюнской террасе Лено-Амгинского междуречья. Алас имеет вытянутую форму, его длина составляет 2 км, а ширина 1 км, высота борта аласа 30 м. Предыдущими исследованиям [Босиков, 1985] на берегу оз. Сырдах подземные льды вскрыты четырьмя скважинами на глубине 2,2–16,6 м. Многочисленные скважины, пробуренные на межаласье, вскрыли мощные повторно-жильные льды (ПЖЛ), нижние части которых, как правило, на несколько метров ниже дна озера. Глубина залегания льда в прилегающем межаласье достигает 45 и 34 м в аласах Онер и Сырдах соответственно.

Нами исследовано обнажение (62°32.638' N, 130°57.915' E) в термоэрозионном овраге глубиной 6 м, шириной 10–15 м. Лед в ПЖЛ по составу пресный ( $M = 0,26$  г/л), в химическом составе преобладают гидрокарбонат-ионы, ионы натрия и калия при слабощелочной реакции (pH 7,9), что не противоречит ранее опубликованным результатам для Центральной Якутии [Васильчук, 2016]. Мерзлые отложения, перекрывающие и вмещающие подземные льды, относятся к незасоленным ( $D_{sal} = 0,12\%$ ), для сезонно-талого покровного суглинка эта величина составляет 0,05%. По химическому составу водорастворимых солей преобладают ионы гидрокарбонатов и натрия–калия

(для сезонно-талого слоя (СТС) — кальция) со слабощелочной реакцией (pH 8,1–8,4). Содержание органического углерода ( $C_{org}$ ) варьирует от 1,2% во вмещающих ПЖЛ суглинках до 2,0–2,2% в горизонтах перекрывающих ПЖЛ.

Включений газов во льду содержится 3–5% от объема льда, концентрация  $CH_4$  изменяется от 82 до 12 ppmv на глубине 1,8 и 7,0 м соответственно (рис. 3).

**Алас Юкэчи** (61°35' N, 130°40' E) расположен в 50 км на восток от г. Якутск, на правом берегу р. Лена, на абалахской террасе. Район характеризуется широким развитием термокарстовых форм рельефа. Высота ПЖЛ достигает 23–24 м [Босиков, 1998]. Ширина жил в верхней части варьирует от 1–1,5 до 2,5–3 м, при этом ширина блоков между жилами составляет менее 5–6 м [Fedorov, Konstantinov, 2003]. В ходе работ нами пробурено 10 скважин глубиной 4–6 м на разных элементах рельефа; кровля льда вскрыта на глубине от 1,8 до 4,1 м. Профиль, пересекающий участок лесного водораздела, залесенный склон и пологую часть аласа, покрытую злаковым разнотравьем и осокой, представлен на рис. 4, на этом рисунке ниже профиля показаны значения концентрации метана и общего газосодержания в соответствующих скважинах.

**Район аласа Нелегер** (62° 18.064' N, 129 °30.192' E) расположен на левом берегу р. Лена на маганской террасе. Рельеф характеризуется чередованием аласов и межаласий, сложенных отложениями ледового комплекса. Здесь распространен мало-

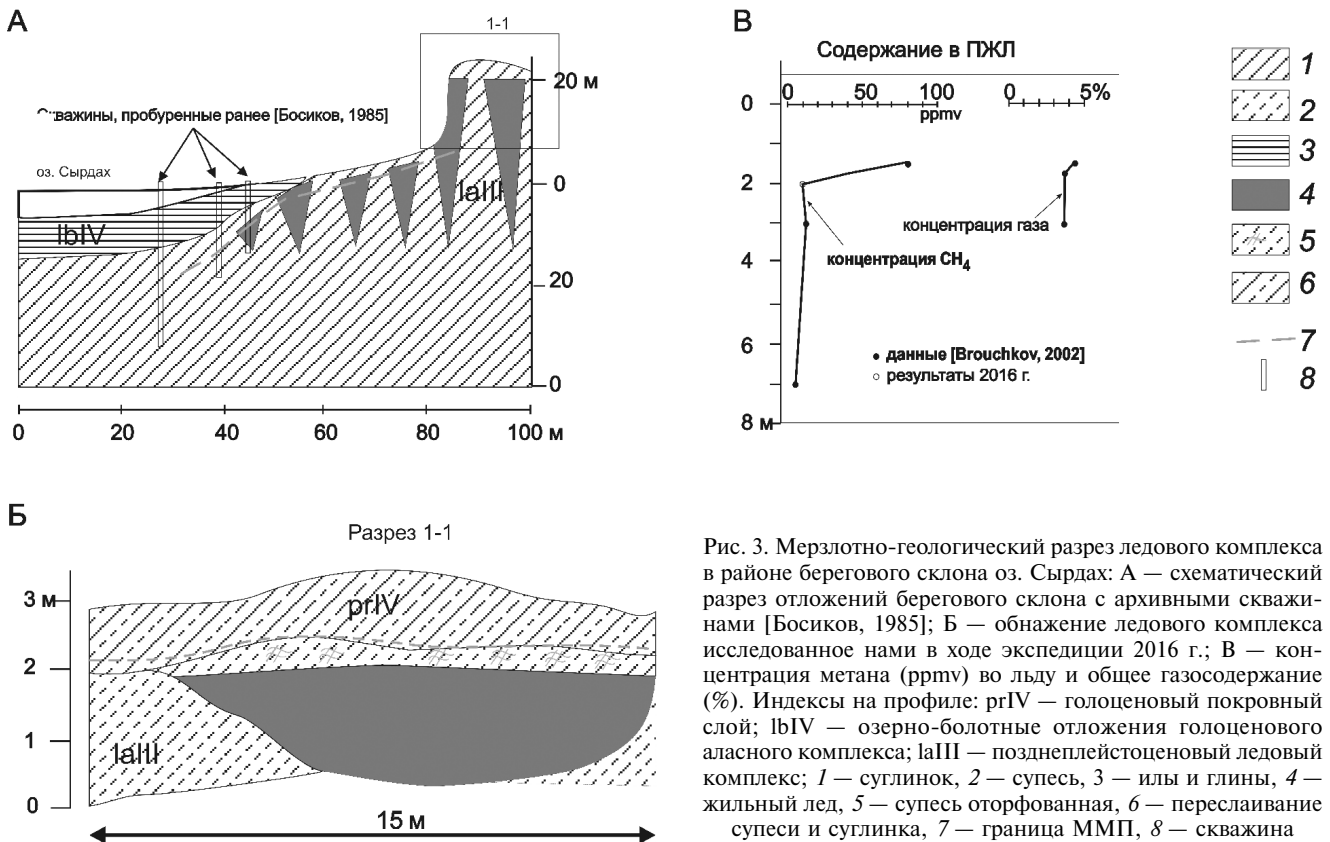


Рис. 3. Мерзлотно-геологический разрез ледового комплекса в районе берегового склона оз. Сырдах: А — схематический разрез отложений берегового склона с архивными скважинами [Босиков, 1985]; Б — обнажение ледового комплекса исследованное нами в ходе экспедиции 2016 г.; В — концентрация метана (ppmv) во льду и общее газосодержание (%). Индексы на профиле: prIV — голоценовый покровный слой; lbIV — озерно-болотные отложения голоценового аласного комплекса; laIII — позднеплейстоценовый ледовый комплекс; 1 — суглинок, 2 — супесь, 3 — илы и глины, 4 — жильный лед, 5 — супесь оторфованная, 6 — переслаивание супеси и суглинка, 7 — граница ММП, 8 — скважина

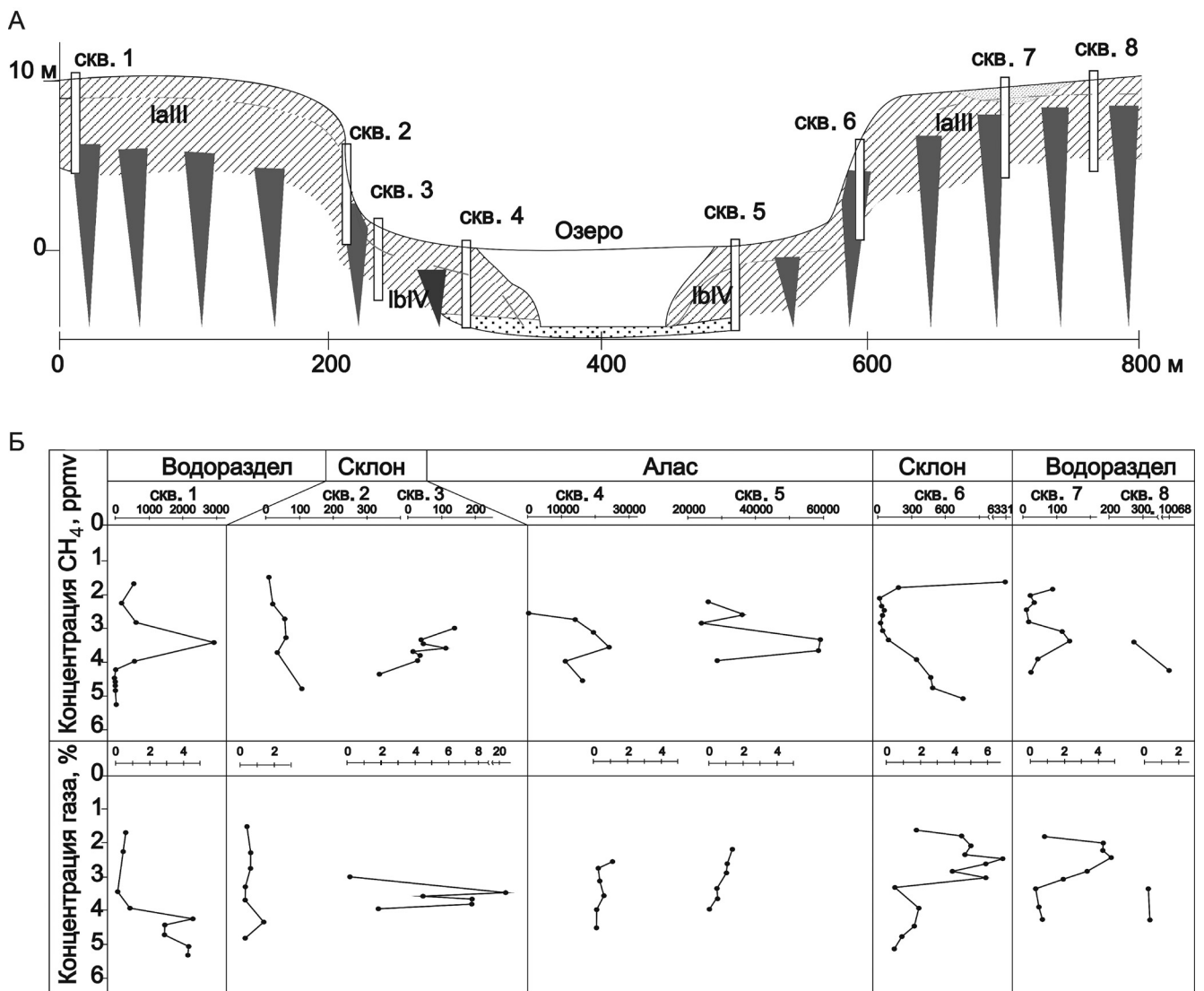


Рис. 4. Мерзотно-геологический профиль ледового комплекса в районе аласа Южэчи (А), концентрация метана (ppmv) и общее газосодержание (%) в отложениях и льдах для различных типов рельефа (Б). Индексы на профиле: lbIV — озерно-болотные отложения голоценового аласного комплекса; laIII — позднеплейстоценовый ледовый комплекс

мощный ледовый комплекс, его толщина не превышает 5–7 м, зрелые термокарстовые котловины врезаны не глубже 3 м от поверхности межаласья. В днищах аласов широко распространены многолетние бугры пучения (булгуняхи). Верхняя часть разреза представлена пылеватыми суглинками, слагающими СТС и верхнюю часть мерзлой толщи, ниже (с 4–6 м) залегают среднезернистые льдистые пески (рис. 5). Верхняя поверхность жильных льдов залегает на глубине 1,5–2,0 м в лесах и на глубине 2,0–2,5 м на межаласных лугах. Ширина жил в верхней части составляет 0,5–1,0 м, а их вертикальная мощность не превышает 2,5–4,0 м.

По химическому составу отложения, вмещающие ПЖЛ, имеют более высокую засоленность, чем в аласе Сырдах, и относятся к засоленным ( $D_{sal}=0,24\%$ ), в составе ионов преобладают гидрокарбонат-ион и калий-натрий, характерна слабощелочная реакция (pH 8,4). Содержание  $C_{орг}$

составляет около 2,6% на глубине 2,0–3,0 м из образцов, отобранных на склоне аласа.

Кроме того, опробовано несколько точек в аллювиальных отложениях террасы р. Лена на участке «Якутский разбой». Район относится к так называемому Якутскому сегменту (местное название — долина Туймаада), где развита одна надпойменная терраса, сложенная голоценовыми отложениями (возраст 9–11 тыс. лет) и вложенные в нее высокая и низкая поймы [Спектор и др., 2008]. Для песков, отобранных с глубины 8 и 12 м в подземелье Института мерзлотоведения СО РАН (ИМЗ), концентрация метана составила 1670,9–8914,0 ppmv; для песков высокой поймы р. Лена (Туймаада) в пределах первых 4-х м — от 73,8 до 438 ppmv. По степени засоленности аллювиальные пески подземелья ИМЗ незасоленные ( $D_{sal}=0,06\%$ ) с преобладанием гидрокарбоната-иона и ионов натрия-калия со слабощелочной

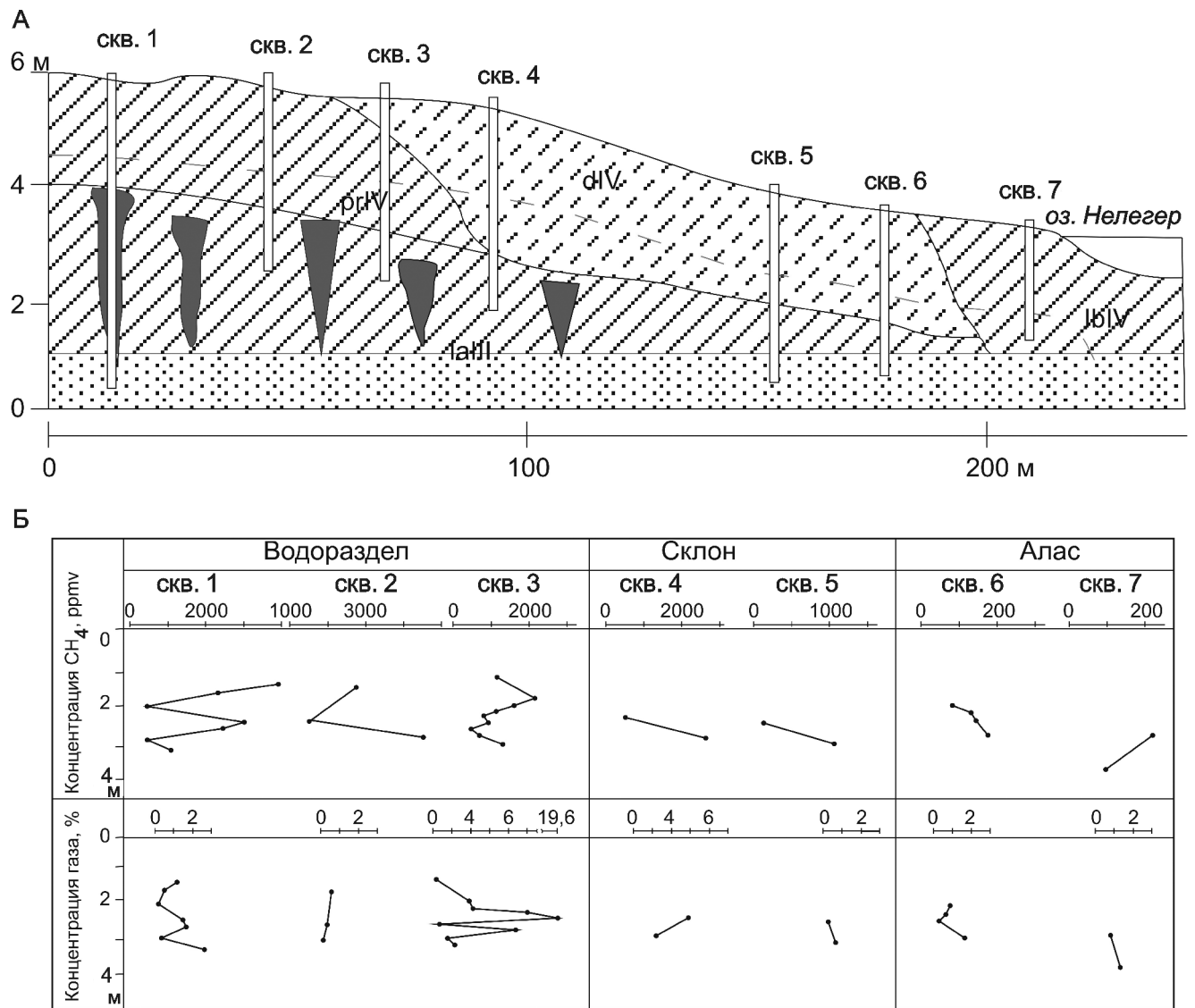


Рис. 5. Мерзлотно-геологический разрез ледового комплекса в районе аласа Нелегер (А), концентрация метана (ppmv) и общее газосодержание (%) в отложениях и льдах для различных типов рельефа (Б). Индексы на профиле: rgIV — голоценовый покровный слой; lbIV — озерно-болотные отложения голоценового аласного комплекса; dIV — голоценовые деллювиальные (склоновые) отложения; laIII — позднеплейстоценовый ледовый комплекс

реакцией (рН 8,1). Содержание C<sub>орг</sub> варьирует от 0,5 до 1,2% для глубины 8 и 12 м.

В результате исследований нами получены значения концентрации метана в верхней части многолетнемерзлых пород Центральной Якутии (таблица) для четырех участков.

Рассматриваемые породы ледового комплекса тунгюлюнской террасы имеют возраст 13 700–19 600 лет (датировки ИМ-360 и ИМ-433, оз. Енер и оз. Сырдах соответственно), на стационаре Юкэчи возраст абалахской террасы составляет 22 300±1200 лет (датировка ИМ-428). Но в литературе указаны датировки абалахской террасы, которые могут быть отнесены к МИС-3 (60–24 тыс. лет назад) [Катасонов и др, 1979]. Таким образом, если накопление абалахской террасы продолжалось на протяжении МИС-3–МИС-2 (60–12 тыс. л. н.), то тунгюлюнская терраса имеет более молодой возраст и может быть

целиком отнесена к МИС-2 (24–14 тыс. л. н.). Для отложений позднеплейстоценового ледового комплекса (ПЖЛ и вмещающие их отложения) тунгюлюнской и абалахской террас правого берега р. Лена средние значения концентрации метана составляют несколько десятков–сотен ppmv. Так, для ПЖЛ в районе оз. Сырдах средние значения концентрации метана составляют 26,4 ppmv, для ПЖЛ и вмещающих отложений межаласья участка Юкэчи средние значения — 73,7 и 203,3 ppmv соответственно. Такая концентрация метана в позднеплейстоценовых ледовых комплексах согласуется с ранее опубликованными данными. Так, в отложениях позднеплейстоценового ледового комплекса на северо-востоке Якутии метан отсутствует или присутствует в следовых количествах [Ривкина и др., 2006]. В Центральной Якутии (правый берег р. Лена) концентрация метана в суглинках ледового комплекса, вмещающих мощные

## Результаты статистической обработки содержания метана в мерзлых породах Центральной Якутии

Точка	Геоморфологический уровень		Отложения, возраст	Число образцов	Среднее, ppmv	Медиана, ppmv	Минимум, ppmv	Максимум, ppmv	Стандартное отклонение
Нелегер	межаласы	водораздел	ПЖЛ, QIII	13	1385,4	1172,9	491,8	3118,1	824,65
			вмещающие суглинки, QIII	18	1949,3	1498,1	324,8	6145,5	1485,8
			покровный слой, QIV	6	1819,4	1449,7	562,4	3951,4	1200,9
	алас	склон	вмещающие суглинки, QIII	12	477,8	169,9	6,7	2707,4	760,0
	алас	днище аласа	суглинки, QIV	6	87,4	62,2	15,8	221,5	83,7
Юэчи	межаласы	водораздел	жильный лед, QIII	23	203,29	38,74	8,6	1576,4	331,73
			вмещающие суглинки, QIII	7	82,8	45,3	3,1	275,9	96,78
			покровный слой, QIV	7	2914	642,3	88,3	10067,7	3899,1
	алас	днище аласа	жильный лед, QIII	11	73,7	32,8	4,5	318,8	99,2
			вмещающие суглинки, QIII	10	177,7	80,9	17,2	493,8	187,07
	алас	днище аласа	суглинки, QIV	5	170855,4	167931,5	115975,4	234346,0	46591,25
Сырдах	межаласы	водораздел	жильный лед, QIII	5	26,4	16,2	12,6	49,0	17,4
Долина р. Лена	I н/п терраса		аллювиальный песок IV	3	5800,7	6813,00	1671	8918	3728,05
	пойма			4	312,6	369,0	73,8	438,0	163,8

сингенетические ПЖЛ (обнажение Мамонтова Гора, абалахская терраса, левый берег р. Алдан), составляет несколько сотен ppmv [Чербунина и др., 2016].

Формирование ледового комплекса на левом берегу р. Лена (стационар Нелегер) происходило в МИС-2, он накапливался одновременно с ледовым комплексом правого берега р. Лена [Гриненко и др., 1995]. Датировки для оз. Спасское, долины руч. Мархинка и Кангаласского мыса укладываются в диапазон 19–23 тыс. л. н. (точки отбора образцов расположены на расстоянии не более 50 км от стационара Нелегер на том же гипсометрическом уровне) [Костюкевич и др., 1987]. Строение ледового комплекса в этом районе сильно отличается от такового на правом берегу р. Лена. На стационаре Нелегер ледовый комплекс маломощный (общая мощность не более 6–8 м), характеризуется двухъярусным строением: верхняя часть разреза представлена пылеватыми сильнольдистыми суглинками, а нижняя — среднезернистыми льдистыми песками. Согласно М.С. Иванову

[1984], этот участок равнины, расположенный на левобережье Лены, отличается от правобережных участков спорадическим распространением и меньшей мощностью подземных льдов, развитых в основном в песчаных и супесчаных отложениях малых рек и водотоков, а, судя по глубине аласных котловин, мощность ледового комплекса в этом районе невелика. В суглинках, а нередко и в песках наблюдаются нитевидные корешки трав, что свидетельствует о субаэральном накоплении осадков [Иванов, 1984]. Этот район можно соотнести с маганской террасой, которая рассматривается как макросклон между долиной Лены и денудационным уровнем Приленского плато.

Концентрация метана в ледовом комплексе на стационаре Нелегер (ПЖЛ и вмещающие суглинки) значительно превышает его содержание в аналогичных отложениях на правом берегу р. Лена — средние значения варьируют в интервале 1385–1900 ppmv. Полученные нами высокие значения концентрации метана свидетельствуют о переувлажненных условиях во время накопления

отложений с большим содержанием органического материала, достаточного для генерации метана. Мы предполагаем, что позднеплейстоценовый ледовый комплекс на левом берегу р. Лена накапливался благодаря большому количеству временных и постоянных ручьев и склоновому смыву в более суровых климатических условиях, чем в голоцене, но в то же время достаточно влажных. Влага могла поступать за счет талых вод со снежников, образовавшихся на Приленском плато. Учитывая, что в районе оз. Нелегер ледовый комплекс хотя и залегает покровно, но характеризуется малой мощностью, можно полагать, что в МИС-2 он накапливался в условиях разлива большого количества мелких водотоков, берущих свое начало на юге, на более высоких уровнях Приленского плато. Этот район и в современное время характеризуется развитой сетью малых водотоков, текущих к р. Лена с Приленского плато. В МИС-2 более высокий базис эрозии в регионе [Спектор и др., 2015] способствовал уменьшению скорости потоков, заболачиванию и накоплению более дисперсных отложений, что подтверждается сменой в разрезе песков пылеватыми суглинками. Периодические разливы водотоков, частая смена русел приводили к покровному накоплению отложений ледового комплекса, а постепенное заболачивание территории способствовало накоплению метана. В то же время за счет сноса материала, который изначально откладывался в аэральных условиях выше на Приленском плато, и быстрому переходу в многолетнемерзлое состояние в суровых условиях МИС-2 растительные остатки не подвергались полному разложению. Таким образом, условия накопления были близки к тем, которые предложены В.В. Куницким [1989] для нивального литогенеза ледового комплекса в дельте р. Лена Д.Г. Шмелевым с соавторами [2013] для низовий Колымы.

Максимальная концентрация метана зафиксирована в аласных отложениях аласа Юкэчи — до 234 346 ppmv при средних значениях  $167\ 932 \pm 115\ 975$  ppmv, но для аласных отложений стационара Нелегер концентрация минимальна и составляет 87,4 ppmv. Мы объясняем это разными стадиями зрелости аласов. На Юкэчи были опробованы отложения молодого аласа, который находится в активной стадии аласообразования, на что указывает активное вытаивание льдов, заболачивание поверхности и формирование термокарстового озера с обрывистыми берегами. Характерны переувлажненные анаэробные условия, которые, вместе с большим количеством органического вещества, поступающим при вытаивании подстилающих отложений и при отмирании и разложении современной растительности в самом аласе, создают благоприятные условия для метаногенеза. Таким образом, произошло (и происходит в настоящее время) промерзание водонасыщенных и

насыщенных метаном отложений. В то же время в районе стационара Нелегер в аласе, который представлен более зрелой формой, на что указывают наблюдаемое обмеление и высыхание озера и рост булгуныха, промерзание отложений произошло после дренирования озерной котловины (и, соответственно, снижения активности микробиомассы, продуцирующей метан, из-за отсутствия анаэробных условий), и весь накопившийся к моменту промерзания метан уже выделился.

Голоценовые аллювиальные отложения в районе г. Якутск представляют собой констративную фацию р. Лена, эта фация накапливалась в дриас-атлантический период голоцена. Согласно радиоуглеродным датировкам растительных остатков из нижней части раздела первой террасы в штольнях под Институтом мерзлотоведения СО РАН возраст на глубине 9–12 м не выходит за пределы 9,6–11,6 тыс. л. Вероятно, высокие значения концентрации метана связаны с его накоплением в ходе заполнения русловыми наносами вреза на рубеже дриаса и пребореала (около 10 тыс. л. н.) [Спектор и др., 2008].

Более низкая концентрация метана в вышележащих горизонтах аллювиального песка высокой поймы, где она уменьшается ближе к поверхности (с 438 до 73,8 на глубине 3,9–2,4 м), вероятно, связана с переотложением ранее накопившегося материала из-за частых изменений размера сечения русла в течение последнего суббореального этапа

**Выводы.** 1. Оттаивание льдистых мерзлых пород ледового комплекса и образование термокарстовых озер — благоприятные факторы для процессов метаногенеза и накопления метана в отложениях. Но после спуска озера и перехода аласа в субаэральные условия возможно выделение накопившегося метана из отложений в случае большого временного интервала перед промерзанием пород. Этим механизмом мы объясняем разницу концентрации метана в аласных отложениях на стационарах Нелегер и Юкэчи.

2. Для отложений ледового комплекса правого (тунгюлонская и абалахская террасы) и левого (маганская терраса) берегов Лены установлена принципиальная разница в содержании метана в подземных льдах и вмещающих отложениях. На левом берегу за счет покровного накопления маломощных толщ в субаквальных условиях и последующего быстрого промерзания метан мог сохраняться в отложениях и льдах. На правом берегу накопление мощных толщ ледового комплекса происходило в более аридных условиях, что препятствовало метаногенезу. Кроме того, возможно, могла происходить и эмиссия метана в атмосферу при промерзании, так как при большой скорости осадконакопления переход в мерзлое состояние происходил за более длительное время.

3. Распределение метана в мерзлых породах и льдах отличается большой изменчивостью

по глубине и в плане как между различными геологическими слоями, так и в пределах одного горизонта, причем разброс значений возрастает с увеличением средней концентрации. Таким образом, можно говорить, что в отложениях с малым содержанием метана благоприятных условий для метаногенеза не было даже на локальном уровне, в то же время при накоплении отложений с высо-

ким содержанием метана при промерзании могло происходить его значительное перераспределение, и возникали зоны с его пониженным и повышенным содержанием относительно среднего. После промерзания перераспределение метана не происходило, несмотря на возникающие градиенты его концентрации.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Босиков Н.П.* Эволюция аласов Центральной Якутии: Автореф. канд. дисс, Якутск, 1985.
- Босиков Н.П.* Изменчивость увлажненности ландшафтов Центральной Якутии и динамика термокарстовых процессов // Проблемы геокриологии. Якутск: Изд-во СО РАН, 1998. С. 123–127.
- Васильев А.А., Стрелецкая И.Д., Мельников В.П., Облогов Г.Е.* Метан в подземных льдах и мерзлых четвертичных отложениях западного Ямала // Докл. РАН. 2015. Т. 465, № 5. С. 604–607.
- Васильчук Ю.К.* Геохимический состав подземных льдов севера Российской Арктики // Арктика и Антарктика. № 2. 2016. С. 23–39. DOI: 10.7256/2453-8922.2016.2.21378. URL: [http://e-notabene.ru/arctic/article\\_21378.html](http://e-notabene.ru/arctic/article_21378.html) (дата обращения: 25. 12. 2016).
- Гриненко В.С., Камалетдинов В.А., Сластинов Ю.Л., Щербаков О.И.* Геологическое строение Большого Якутска // Региональная геология Якутии. Якутск: Изд-во Якут. гос. ун-та, 1995. С. 3–20.
- Иванов М.С.* Криогенное строение четвертичных отложений Лено-Алданской впадины. Новосибирск: Наука, 1984. 146 с.
- Костюкевич В.В., Днепровская О.А.* Радиоуглеродные данные лаборатории геохимии мерзлой зоны Института мерзлотоведения СО АН СССР. Сообщение VIII // Бюлл. комиссии по изучению четвертичного периода. 1987. № 56. С. 165–168.
- Катасонов Е.М., Иванов М.С., Пудов Г.Г.* и др. Строение и абсолютная геохронология аласных отложений Центральной Якутии. Новосибирск: Наука, 1979.
- Куницкий В.В.* Криолитология низовья Лены. Якутск, 1989. 162 с.
- Малкова Г.В., Павлов А.В., Скачков Ю.Б.* Оценка устойчивости мерзлых толщ при современных изменениях климата // Криосфера Земли. 2011. Т. 15, № 4. С. 33–36.
- Ривкина Е.М., Краев Г.Н., Кривушин К.В.* и др. Метан в вечномёрзлых отложениях северо-восточного сектора Арктики // Криосфера Земли. 2006. Т. 10, № 3. С. 23–41
- Соловьев П.А.* Криолитозона северной части Лено-Амгинского междуречья. М.: Изд-во АН СССР, 1959.
- Спектор В.Б., Бакулина Н.Т., Спектор В.В.* Рельеф и возраст аллювиального покрова долины р. Лены на «Якутском разбое» // Геоморфология. 2008. № 1. С. 87–94.
- Спектор В.В., Спектор В.Б., Бакулина Н.Т., Парфёнов М.И.* Роль ледников в преобразовании рельефа Лено-Амгинской равнины в плейстоцене и голоцене // Наука и образование. 2015. № 1. С. 42–49.
- Чербунина М.Ю., Брушков А.В.* Метан в позднеплейстоценовом ледовом комплексе Центральной Якутии (Мамонтова Гора) // Мат-лы 5-й конф. геокриологов России (МГУ имени М.В. Ломоносова, 14–17 июня 2016 г.). Т. 3. М.: Университетская книга, 2016. С. 168–173.
- Шмелев Д.Г., Розгов В.В., Губин С.В., Давыдов С.П.* Криолитогенные отложения на правом берегу низовий реки Колыма // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2013. № 3. С. 66–72.
- Arkhangelov A.A., Novgorodova E.V.* Genesis of massive ice at 'Ice Mountain', Yenesei River, Western Siberia, according to results of gas analyses // Permafrost and Periglac. Process. 1991. Vol 2. P. 167–170.
- Boereboom T., Samyn D., Meyer H., Tison J.-L.* Stable isotope and gas properties of two climatically contrasting (Pleistocene and Holocene) ice wedges from Cape Mamontov Klyk, Laptev Sea, northern Siberia // Cryosphere. 2013. Vol. 7. P. 31–46.
- Brouchkov A., Fukuda M.* Preliminary measurements on methane content in permafrost, central Yakutia, and some experimental data // Permafrost and Periglac. Processes. 2002. Vol. 13, N 3. P. 187–197.
- Fedorov A., Konstantinov P.* Observations of surface dynamics with thermokarst initiation, Yukechi site, Central Yakutia // Proceed. of the 8th Internat. Conf. on Permafrost (21–25 July 2003, Zurich, Switzerland). AA Balkema, Lisse, the Netherlands, 2003. P. 239–243.
- Schuur E. A. G., McGuire A. D., Schädel C. et. al.* Climate change and the permafrost carbon feedback // Nature. 2015. Vol. 520. P. 171–179
- IPCC, 2014: Climate Change 2014: Synth. Rep. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland. 151 p.

Поступила в редакцию  
28.12.2016