

## ПАЛЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ЭКСПЕДИЦИЯ «БЕРИНГИЯ»

Д.А.ГИЛИЧИНСКИЙ (ИФХИБП РАН)

**Район исследований.** Тундровая зона и подзона северной тайги приморских низменностей восточного сектора Арктики (120-165° в.д., 65-72° с.ш., абс. отм. до 100 м над уровнем моря) в области сплошного распространения многолетнемерзлых пород междельтой р. Лены и устьем р. Колымы (рис. 1).

Экспедиция проводит полевые исследования на северо-востоке страны непрерывно с 1978 г. За этот период в исследованиях приняли участие более 200 российских ученых, студентов и аспирантов (мерзловеды, геологи, палеонтологи, микробиологи, почвоведы, географы), а также иностранные специалисты. Имея многолетний опыт полевых работ в районах вечной мерзлоты и уникальный коллектив опытных исследователей и молодых специалистов, экспедиция выполняет разделы Федеральных научно-технических программ, программ Президиума РАН и грантов РФФИ. В работе участвуют сотрудники академических институтов, студенты и аспиранты всех полевых факультетов МГУ. По результатам работ в отечественных и зарубежных изданиях опубликовано более 100 статей.

Итогом экспедиционных исследований является обнаружение в мерзлых толщах, погребенных позднеплейстоценовых почвах и линзах отрицательно-температурных рассолов (криопэгах) палеобиологических объектов (микроорганизмов, простейших, мхов и семян), сохраняющих жизнеспособность на протяжении позднего кайнозоя. При оттаивании они восстанавливают свои физиологические характеристики и заново вовлекаются в биогеохимический круговорот, участвуя в формировании современного биоразнообразия. Показано, что вечная мерзлота является криобанком генетических ресурсов (биота и потенциально активные продукты ее жизнедеятельности: биомолекулы, ферменты и пигменты - это законсервированный в мерзлоте генофонд) и резервуаром выведенных из современного биогеохимического круговорота углеродсодержащих парниковых геогазов (углекислоты и метана), присутствующих только в криолитосфере. Неотъемлемым элементом полевых работ является изучение разнообразия почвенного покрова и непрерывный мониторинг мерзлотных условий.

**Исследования по программам МПГ.** В рамках Международного полярного года экспедиция выполняла национальный проект «БиоГеоГаз» (Парниковые газы в вечной мерзлоте) и российскую часть трех международных проектов:

1. TSP (Thermal State of Permafrost) - Термическое состояние вечной мерзлоты: вклад России в проект IPY/TSP.

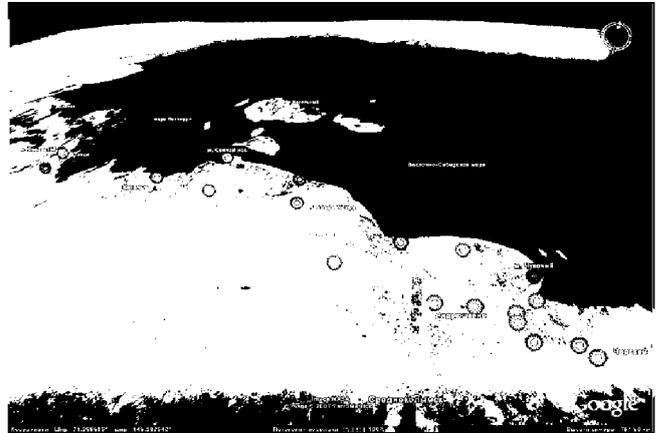


Рис. 1. Район исследований

2. CALM (Circumpolar Active Layer Monitoring) - Циркумполярный мониторинг деятельного слоя.

3. RASCHER (Реакция арктических и субарктических почв на изменение условий на Земле: изучение динамики и пограничных состояний).

Исполнители: к.г.-м.н. АААбрамов, д.б.н. С.В.Губин, к.гн. О.П.Занина, к.г.-м.н. Е.М.Ривкина, с.н.с. В.Е.Остроумов, с.н.с. Е.В.Спирина, к.б.н. Д.В.Тихоненков (ИБВВ РАН), с.н.с. Д.Г.Федоров-Давыдов, к.г.-м.н. А.Л.Холодов, с.н.с. А.В.Шатилович, н.с. Н.С.Зимов (ТИГ ДВО РАН), н.с. Л.А.Шмакова, к.б.н. В.А.Щербакова (ИБФМ РАН), инженеры: ЛАГуляева, Л.П.Кондакова, ЛАПасницкая, аспиранты: А.А.Веремеева, Г.Н.Краев, К.В.Кривушин, В.Г.Мамыкин, В.А.Миронов, А.В.Лупачев, магистрант Д.В.Ступин.

**Термическое состояние вечной мерзлоты в восточном секторе Арктики - проекты CALM и TSP.** Ответственные исполнители: Д.Г.Федоров-Давыдов, А.Л.Холодов. Большинство сценариев изменения климата основано на исследовании колебаний температуры воздуха. Однако для многих теоретических и прикладных задач важен отклик земной поверхности на эти изменения. Для России, более половины которой занято самой чувствительной к изменениям климата оболочкой - вечной мерзлотой, этот отклик имеет первостепенное значение, так как определяет изменения природных обстановки, как следствие, инфраструктурные риски. Особое внимание к проблеме диктуется усиливающимся общественным беспокойством в связи с глобальным потеплением. Для выводов в планетарном масштабе имеющихся данных пока недостаточно. Целью исследований являлось определение реакции приповерхностной толщи восточного сектора Российской Арктики на текущие климатические флуктуации.

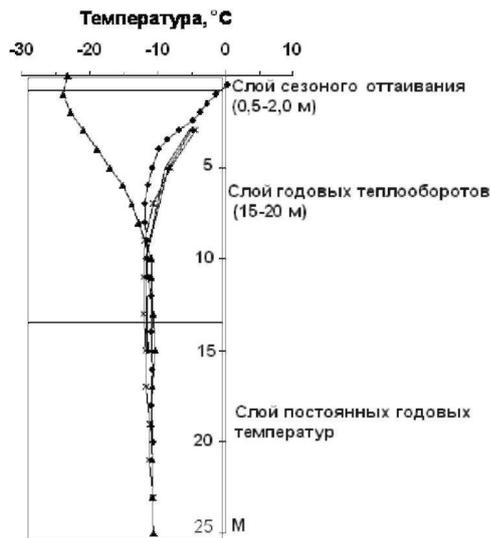


Рис. 2. Основные термические горизонты вечной мерзлоты, формирующиеся под воздействием климата

**Объект исследований.** Создана сеть наблюдений за реакцией многолетнемерзлых пород приморских низменностей восточного сектора Арктики на изменения климата (рис. 1). Мониторинг ведется за приповерхностной толщей, подверженной влиянию климатических колебаний и состоящей из трех различных по термическому режиму горизонтов (рис. 2):

1. Профиль мерзлотных почв с положительными температурами летом и отрицательными - зимой, совпадающий с мощностью слоя сезонного оттаивания (деятельного слоя) и подстилаемый вечной мерзлотой.

2. Слой годовых теплооборотов, с «плавающими» в течение года отрицательными температурами.

3. Слой постоянных годовых отрицательных температур, не зависящих от сезонных колебаний температур на поверхности (слой нулевых годовых амплитуд).

Режимные наблюдения за глубиной сезонного оттаивания почв в теплый период ведутся непрерывно с 1989 г. на 15-ти стационарных участках (рис. 3): 11 точек характеризуют арктическую, типичную и южную подзоны тундры, две точки относятся к подзоне северной тайги и две - к интразональным пойменным экосистемам (CALM - Circumpolar Active Layer Monitoring / Мониторинг активного циркумполярного слоя).

Динамика глубин сезонного оттаивания связана с летними температурами воздуха. Предыдущий максимум глубин сезонного оттаивания соответствовал термическому максимуму 1991 г. В середине 90-х годов мощность слоя сезонного оттаивания сократилась, затем вновь стала расти и в настоящее время по большинству фаций превзошла уровень 1991 г (рис. 4). Однако наблюдавшиеся максимумы соответствуют короткопериодным максимумам температур, и преждевременно связывать увеличение глубин сезонного оттаивания с глобальным потеплением.

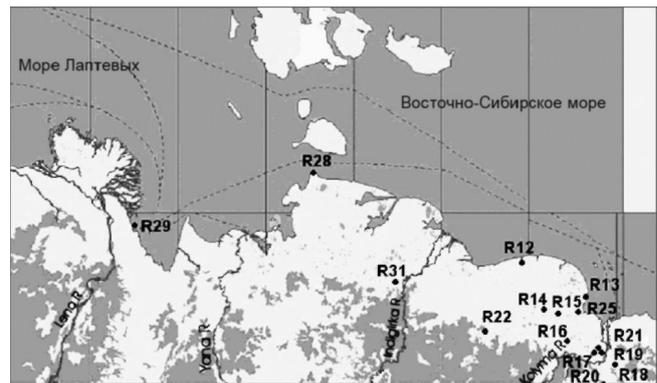


Рис. 3. Сеть участков стационарных режимных наблюдений за динамикой деятельного слоя:

R12 - р. Куропаточья (склон и плакор); R13 - мыс Чукочий (плакор и алас); R14 - р. Чукочь; R15 - р. Коньковая (плакор и алас); R16 - болуныя «Сегодня»; R17 - виска Ахмело; R18 - г. Родинка; R19 - оз. Глухое; R20 - протока Мальчиковская; R21 - оз. Ахмело; R22 - р. Алазея; R25 - оз. Якутское; R28 - мыс Святой Нос; R29 - мыс Быковский (плакор и алас); R31 - р. Аллаиха

Цель мониторинга температурного режима мерзлых пород - создание единой сети температурных наблюдений в криолитозоне и единой базы данных для контроля термического состояния вечной мерзлоты (Thermal State of Permafrost). В рамках программы мониторинг в Восточной Арктике ведет экспедиция «Берингия». Сеть наблюдений (рис. 5) включает около 100 скважин. Глубина их составляет 25 м, охватывая все термические горизонты: деятельный слой, слой годовых теплооборотов и слой постоянных годовых температур. Согласно методике мерзлотной съемки, шаг измерений составляет 0,5 м в первых пяти метрах от поверхности, до 15 м измерения проводят через 1 м, а далее через 2,5 м. На начальном этапе среднегодовая температура пород определялась одновременными замерами в скважинах, а в последние годы - с помощью круглогодично фиксирующих температурный режим логгеров.

Температурные замеры в скважинах в течение 5-15 лет не фиксируют каких-либо изменений среднегодовых температур мерзлых толщ в конце прошлого века, ни в начале нынешнего (рис. 6-9). Для определения термического состояния вечной мерзлоты необходимы более длинные ряды наблюдений. К сожалению, сотни скважин, пробуренных в прошлом веке в Российской Арктике, разрушены. Если начинать заново, то изменения среднегодовых температур можно будет зафиксировать лишь спустя десятилетия. Нами предложено не создание новой, а воссоздание старой сети. В точке, где когда-либо был произведен замер, должна быть заложена новая скважина и проведено повторное измерение. Тем самым ноль-момент для мониторинга сдвигается на десятилетия назад, позволяя вовлечь в ре-анализ старые данные и получить сведения об отклике мерзлой толщи на климатические изменения за период между замерами. В 2007 г на пойме Колымы восстановлена скважина,

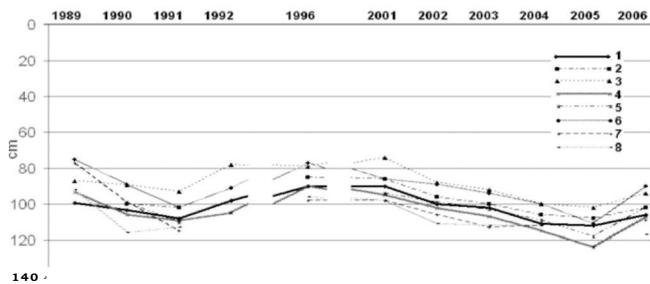


Рис. 4. Многолетняя динамика мощности деятельного слоя на различных элементах микро- и нанорельефа на тундровом участке в окрестностях оз. Ахмело (R21):

1 - вершина микроувала, кочки бугорков; 2 - вершина микроувала, понижение между кочками в пределах бугорков; 3 - вершина микроувала, межбугорковые западинки; 4 - склон микроувала, кочки бугорков; 5 - склон микроувала, понижения между кочками в пределах бугорков; 6 - склон микроувала, межбугорковые западинки; 7 - микродепрессия, незадернованные пятна; 8 - микродепрессия, бордюры вокруг пятен

где в 1981 г. термометрические наблюдения велись декадно. Сравнение данных 1981 г с замерами 2007 и 2008 г. не выявили различий между нынешней температурой вечной мерзлоты и ее прошлым, 25-летней давности, термическим режимом (рис. 10). Аналогичные данные получены на водоразделе в устье р. Омолон. В 2009 г. эта работа будет продолжена в бассейне рек М. Коньковая и Б. Чукочья.

Результаты многолетних наблюдений за динамикой деятельного слоя на площадках и температурным режимом вечной мерзлоты на статистически и пространственно репрезентативной сети скважин говорят о минимальном отклике термического состояния почвенного покрова и верхних горизонтов криолитосферы Восточной Арктики на текущие флуктуации климата по сравнению с другими регионами. Скорее всего, это связано с высокой льдистостью криосистем, стабилизирующей их термическое состояние за счет теплоты фазовых переходов.

**Реакция арктических и субарктических почв на изменение условий на Земле: изучение динамики и пограничных состояний.** Почва характеризуется как очень инертными, так и изменчивыми параметрами. Проект RASCHER сфокусирован на изучении временных изменений лабильных почвенных характеристик, для которых проявление трендовых изменений может быть зафиксировано через десятки лет. Цель проекта - изучить, как климатические изменения могут повлиять на почвенные системы полярных областей и их устойчивость. Несмотря на то, что биологи ведут изучение особенностей состава и таксономической принадлежности организмов тундровых почв уже более полувека, изучены они явно недостаточно. Для восполнения этого пробела в 2007-2008 гг. оценено биотическое состояние (численность и биоразнообразие микробных сообществ и протистофауны) основных типов мерзлотных почв тундровых экосистем Восточной Арктики (Колымской низменности): подбур

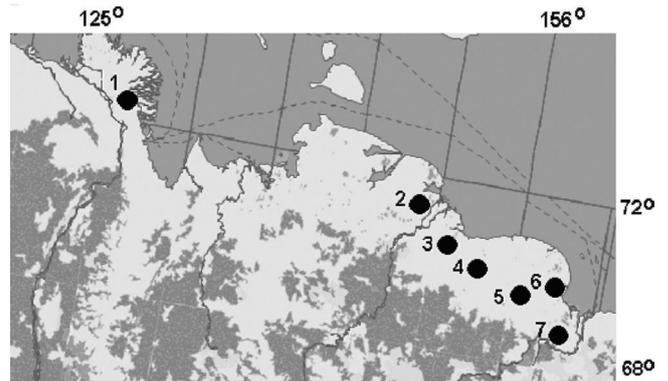


Рис. 5. Схема расположения скважин наблюдательной сети:

1 - Быковский полуостров; 2 - низовья бассейна р. Индигирки; 3 - верховья р. Б. Хомус-Юрях; 4 - Алазейские разрезы; 5 - Чукочья едома; 6 - побережье Восточно-Сибирского моря; 7 - Халерчинская тундра; 8 - мыс Святой Нос; 9 - Омолон-Анюйская едома

оподзоленный песчаный (горизонты Т; E-Bfh2), глеезем тяжелосуглинистый (горизонты Ah; B1) и криозем глееватый тяжелосуглинистый (горизонты Ah-Bh; B1). Для ответа на вопрос, как климатические и антропогенные факторы влияют на организмы тундровых почв, необходимо проведение через 20-30 лет повторных исследований на тех же объектах, а результаты данного проекта послужат 0-моментом для долговременных мониторинговых наблюдений и оценки тенденций изменений тундровой почвенной биоты под воздействием природных и антропогенных факторов.

**Микроорганизмы.** Ответственный исполнитель: Е.В. Спирина. Современное представление о видовом разнообразии и структуре микробных сообществ мерзлотных почв Арктики основывается на сведениях, полученных методами классической микробиологии. Однако микроорганизмы, выделяемые в лабораторных условиях, не могут являться количественно или экологически значимыми в оценке микробного разнообразия криолитозоны. Работ по изучению видового состава микробных популяций почв молекулярно-генетическими методами немного, лишь некоторые из них отражают попытку решить проблему, но библиотеки клонов все еще малочисленны и недостаточны для характеристики микробного разнообразия тундровых почв по сравнению с другими северными почвами.

В мерзлотных почвах Колымской низменности максимальная численность клеток прокариотических микроорганизмов (106-107 кл./г) выявлена при культивировании при 20 °С, что характерно для мезофилов. Особенность подбур - контраст между органоминеральными и минеральными горизонтами: средняя численность микроорганизмов в торфянистом горизонте (5,1 млн кл./г) была в 80 раз выше, чем в минеральных горизонтах (0,07 млн кл./г), в то время как для криоземов и глееземов подобные отношения составляли 3,6 и 2,0 соответственно. В криоземе и глееземе численность микроор-

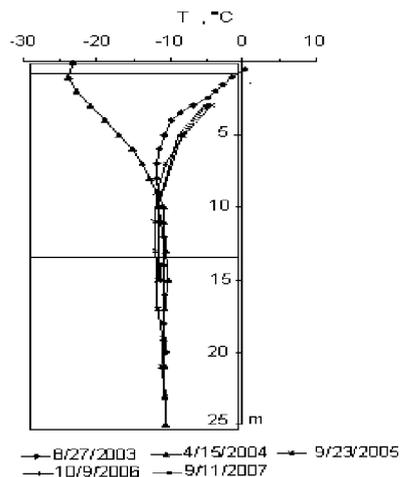


Рис. 6. Среднегодовая температура многолетнемерзлых пород на водоразделах побережья моря Лаптевых, сложенных ледовым комплексом (скв. 13/03, мыс Быковский)

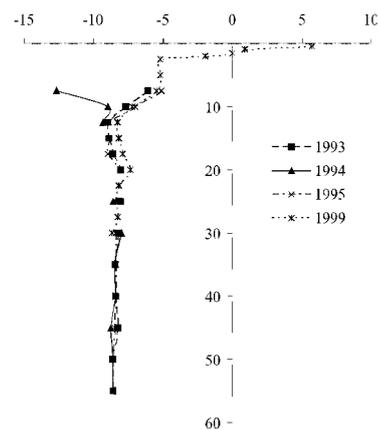


Рис. 7. Среднегодовая температура многолетнемерзлых пород плоских аласных уровней (скв. 2000/04, мыс Малый Чукочий)

ганизмов в органогенном и суглинистых горизонтах составила 105-106 кл./г. В криоземе рост клеток при отрицательной температуре выявлен лишь для минерального горизонта. В глееземе численность микроорганизмов в спектре положительных температур обусловлена ростом гетеротрофов органогенного горизонта при 37 °С (105 кл./г) и ростом олиготрофов минерального горизонта при 55 °С (104 кл./г).

Генетическое разнообразие фило типов прокариот исследовали в тундровом криоземе. Сконструировано 6 уникальных библиотек клонов, несущих последовательности 16S рРНК генов микроорганизмов и насчитывающие 243 вновь выявленных фило типа. Определены их нуклеотидные последовательности и представлена доля клонов разных филогенетических групп в микробном сообществе (рис. 11). Во всех пробах отмечено доминирование филогенетических групп *Proteobacteria* и *Unclassified bacteria*, тогда как доля других бактериальных групп варьировала в зависимости от типа инкубации или способа выделения тотальной ДНК. Поэтому мы приводим суммарные показатели для нуклеотидных последовательностей всех проб, которые отнесены к 15 филогенетическим группам.

Большинство клонов (29,3 %) принадлежат к группе бактерий с неопределенным местоположением в системе прокариот, тем самым отражая факт, что большинство почвенных микроорганизмов никогда не было выделено в чистую культуру, а как результат этого - полное отсутствие данных о физиологии и биохимии представителей данных филогенетических групп. Уменьшение доли представителей этой группы в сообществе после анаэробной инкубации почвы говорит об аэробной природе данных фило типов. Второе место по числу выявленных фило типов занимает группа *Proteobacteria* (40,4 %) со значительным доминированием представителей подкласса beta - 23,9 %, в сравнении с подклассами alpha - 5,7 %, gamma -

5,7 % и delta - 4,5 %, что согласуется с данными, полученными по тундровым почвам в дельте р. Лены методом FISH (Kobabe et al., 2004). Распределение других групп бактерий выглядит следующим образом: представители группы Gram-positive bacteria, включающие микроорганизмы родов *Actinobacteria* (9,5 %) и *Firmicutes* (0,8 %), затем *Gemmatimonadetes* (7,8 %), *Nitrospira* (3,3 %), группа *Cytophaga-Flexibacter-Bacteroides* (2,4 %), *Verrucomicrobia* (2,4 %), *Acidobacteria* (1,6 %). Остальные микроорганизмы выявлялись в количестве менее 1 % от всего сообщества.

Дендрограмма, отражающая таксономическое положение вновь выявленных фило типов минорных филогенетических групп в системе прокариот для тундрового криозема, представлена на рис. 12. Только четверть последовательностей 16S рРНК вновь выявленных фило типов имеют 100 % сходство с таковыми у ранее описанных бактерий или природных клонов, тогда как для большинства клонов сходство составляет 95 % и менее. Более 35 % выявленных фило типов могут быть отнесены к филогенетическим группам различных природных клонов и клонам некультивируемых бактерий.

Филогенетическое разнообразие выявленных фило типов микроорганизмов мерзлотных почв восточного сектора Арктики отражает сложную и малоизученную структуру микробных сообществ региона и является первым практическим шагом на пути к решению такой сложной задачи, как классификация микробных сообществ по типам почв Арктики.

**Протистофауна.** Ответственные исполнители: Д.В.Тихоненков, А.В.Шатилович, Л.А.Шмакова. Простейшие (Protozoa) - одноклеточные гетеротрофные эукариоты, входящие в состав Protista, традиционно включают в себя три больших полифилетических группы микроорганизмов, отличающихся по типу организации клетки, инфузории, жгутиконосцы и амебодные простейшие. В почвах Protozoa - наи-

более многочисленные микроорганизмы. Так, численность гетеротрофных жгутиконосцев и голых амёб может достигать миллионов особей/см<sup>3</sup>. Простейшие играют важную роль в почвах благодаря пищевой активности, а также для разложения органического материала и химических веществ.

Несмотря на многочисленность, богатое видовое разнообразие и повсеместное распространение, почвенные простейшие довольно плохо изучены. Особенно это касается тундровых почв, где простейшие занимают заметное место, однако работ по изучению протистофауны тундровых почв в мировой литературе на сегодняшний день крайне мало. Обнаруженные и описанные ниже виды простейших, помимо морфологических адаптаций и наличия у некоторых организмов покоящихся стадий, характеризуются рядом физиологических особенностей, позволяющих им выживать в условиях глубоко промораживаемых тундровых почв.

**Гетеротрофные жгутиконосцы.** Выявлено 36 видов и форм гетеротрофных флагеллят из 13 таксономических групп (рис. 13). Наибольшим видовым богатством характеризуются церкомонады (13 видов), хоанофлагелляты (7 видов), кинетопластиды (4 вида), хризомонады (4 вида). Наиболее часто встречались *Heteromita minima*\* (Hollande, 1942, Mylnikov and Karpov, 2004, вид обнаружен в 70 % исследованных местообитаний), *Cercomonas bodo* (Meyer, 1897, Mylnikov and Karpov, 2004, 70 %), *S. agilis* (Moroff, 1904, Mylnikov and Karpov, 2004, 60 %), *Paraphysomonas* sp. (60 %), *Protaspis simplex* Vbrs, 1992 (40 %), *Lagenoeca globulosa* France, 1897 (40 %). Число видов в ценозах изменялось от 2 до 17. Наибольшее число видов гетеротрофных флагеллят выявлено в сообществе псаммобиионтов, наименьшим богатством характеризуются ценозы растительной подстилки. В целом сообщества эдафобиионтов характеризуются более высокими величинами видового богатства по сравнению с ценозами растительной подстилки и перегнойного горизонта. Сообщества более глубоких горизонтов (характерные виды *Heteromita globosa* (Stein, 1878), *Cercomonas bodo*, *Allantion tachyploon* (Sandon, 1924), *Lagenoeca globulosa*, *Codonosiga botritus* (Kent, 1880) отличаются от таковых в поверхностном слое.

Среди более 200 видов гетеротрофных жгутиконосцев большинство изначально описано из пресных вод. Среди гетеротрофных флагеллят в почвах ранее описаны только *Allantion tachyploon* и *Colponema edaphicum* (Mylnikov et Tikhonenkov, 2007). При этом представители родов *Stokesiella* и *Goniomonas* обнаружены в почвах впервые. Биоразнообразие гетеротрофных флагеллят тундровых почв сложено редкими, спорадически отмечаемыми видами. Исключение - *Bodo designis* Skuja, 1948, который входит в двадцатку наиболее часто встречающихся видов гетеротрофных жгутиконосцев мировой фауны.

\*Ссылки после латинских названий указывают на автора и год описания вида или таксона

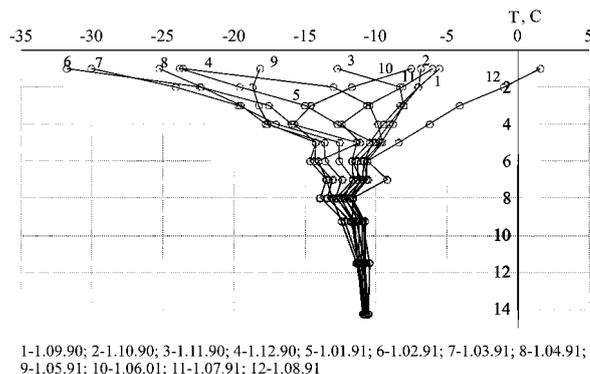


Рис. 8. Среднегодовая температура многолетнемерзлых пород под дном глубоко врезанного аласа (скв. 3/92 - р. М. Коньковая)

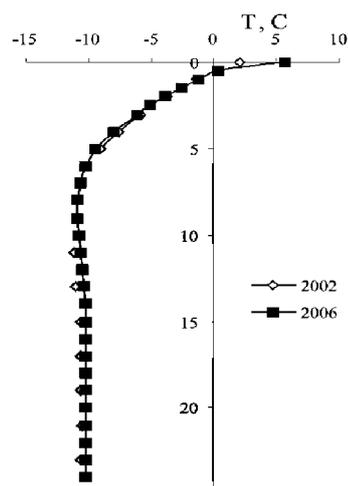


Рис. 9. Многолетняя динамика температурного поля мерзлой толщи на водоразделе рек Чукотья и Алазея. Скв. 4/79, даты замеров: 15.08.1979; 14.08.1980; 23.07.1982; 01.12.1990; 01.05.1991; 17.08.1994; 01.09.1999

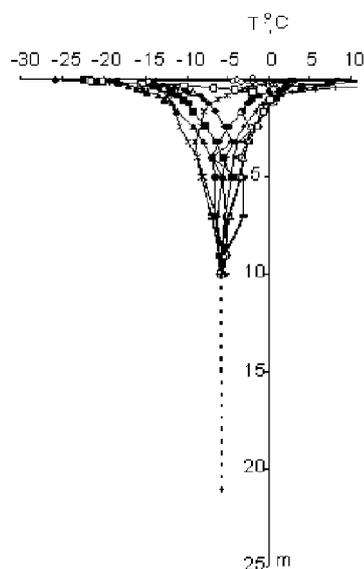


Рис. 10. Температурный режим мерзлых отложений Колымской поймы. Скв. 12/80. Даты замеров: 1981 - 13.01, 14.02, 15.03, 13.04, 13.05, 15.06, 14.07, 15.08, 17.09, 16.10, 13.11, 9.12. 2007 - 27.08, 28.09

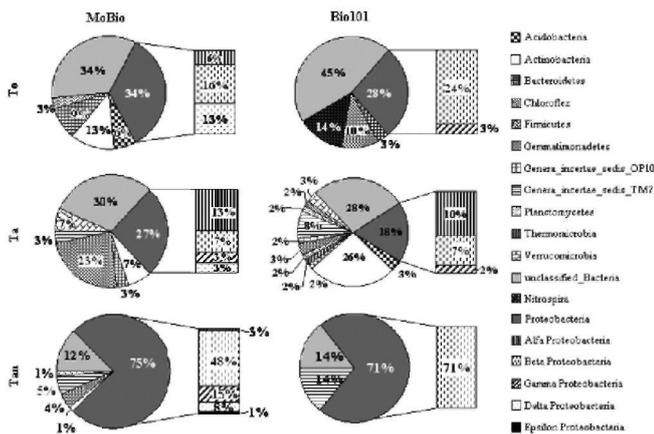


Рис 11. Разнообразии микроорганизмов в тундровом криоземе

**Инфузории.** Обнаружено 13 видов цилиат, относящихся к 6 таксономическим группам (рис. 14). Число видов в разных местообитаниях варьирует от 1 до 11. По видовой структуре сообщества цилиат мало отличаются, однако максимальное число видов отмечено для подбуря. В разных горизонтах сообщества инфузорий отличаются по видовому составу - основное видовое разнообразие сосредоточено в растительной подстилке и перегнойном горизонте, тогда как в минеральных горизонтах встречен только 1 вид - *Cyclidium muscicola*. Преобладают представители группы коллоидных (Colpodea) инфузорий: *Colpodasteinii*, *C.inflata*, *C.aspera*, *C.sp. 1*, *C.sp.2*, *Pseudoplatyophrya* aff. *vorax*, *Cyrtolophosis mucicola*, *Cyclidium muscicola*. Помимо доминирующих коллоидных инфузорий, встречены: *Pseudomicrothorax* aff. *agilis* (Nassophorea), *Blepharisma* aff. *americanum* (Karyorelictea), *Chilodonella* sp. (Phyllopharyngea), *Halteria* aff. *grandiella* (Spirotrichea), *Oxytricha* sp. (Spirotrichea). Все виды - эврибионты, встречающиеся в водных, моховых и почвенных биотопах. Для выделенных инфузорий характерно наличие цист покоя в жизненном цикле.

**Амебодные организмы.** Амебодные простейшие, обитающие в почве, объединены в одну «функциональную группу» и схожи по типу организации клетки (наличие псевдоподий), несмотря на то, что они очень разнообразны и систематически гетерогенны. Группа включает в себя раковинных амеб (*Teatacea*), аксоподиальных простейших (*Heleozoa*, *Radiolaria*, *Foraminifera*) и голых амеб (*Gymnamoeba*, *Filozoa*). Рако-

винные амебы не учитывались, так как их исследование требует отдельных методов.

Отмечено более 100 видов *Gymnamoeba* (рис. 15), отнесенных к 14 морфотипам, 12 видов филозных амеб, 6 видов солнечников. Выявлено большинство известных семейств свободноживущих аэробных амеб в рамках типа Rhizopoda. Самым богатым в морфологическом разнообразии голых и филозных амеб оказался криозем (50 видов), в подбуре и глееземе количество предполагаемых видов примерно одинаково и меньше, чем в криоземе (40).

Амебы, принадлежащие морфотипу Fan-shaped, встречены только в криоземе, причем в доминирующем количестве. Основная часть видов морфотипа Fan-shaped (9 видов) относится к роду *Vannella*. Самыми распространенными морфотипами в изученных почвах оказались acanthopodial, dactylopodial, eruptive. Из минеральных горизонтов выделяются всего несколько видов мелких амеб (до 25 мкм) морфотипов: eruptive, acanthopodial, monotactic, dactylopodial, branched. Представители акантоподи-

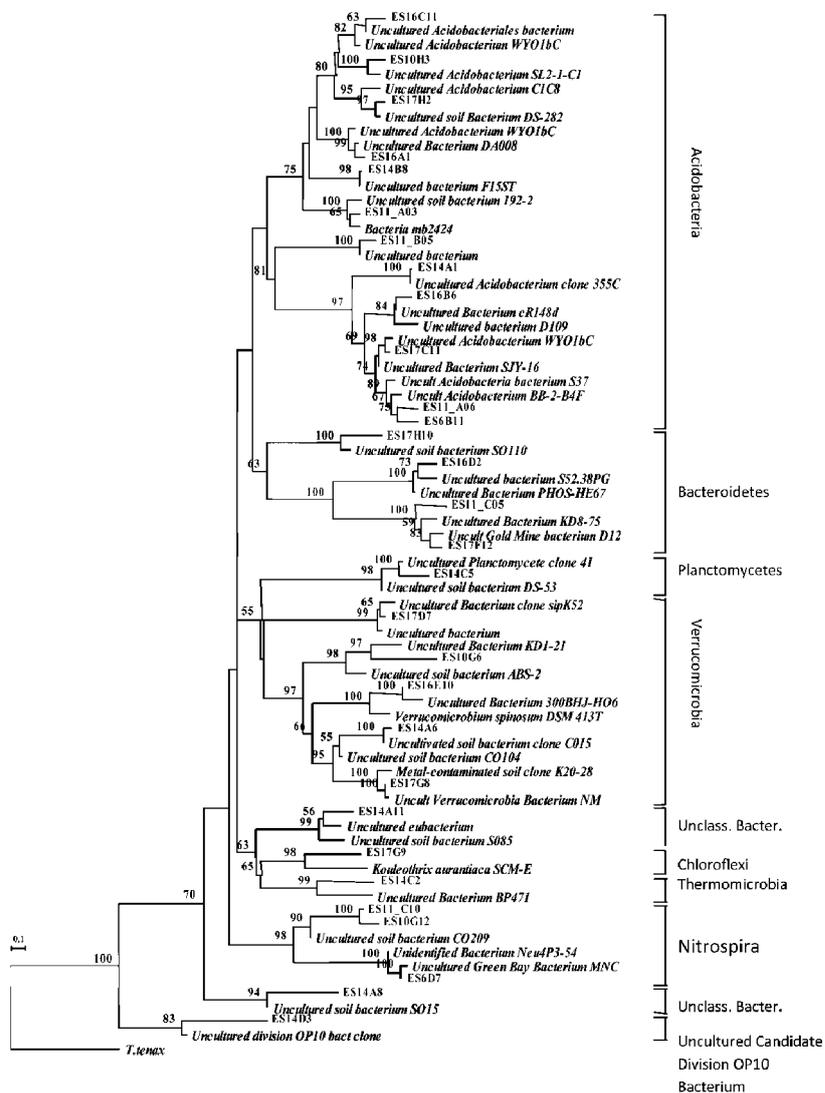


Рис. 12. Филогенетическое разнообразие минорных групп прокариотического микробного сообщества тундрового криозема

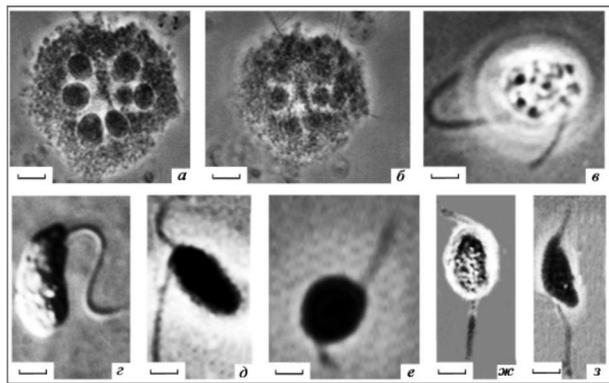


Рис. 13. Видовое разнообразие гетеротрофных жгутиконосцев: а, б - *Spongomonas wells*, в, г - *Allantion tachyploon*; д - *Heteromita globosa*; е - *H. minima*; ж - *Protaspis simplex*, з - *Bodo designis*. Масштабная линейка: а, б - 7 мкм; в, г, ж, з - 3 мкм; д, е - 1,5 мкм

ального морфотипа встречаются в минеральных горизонтах всех изученных почв. Выделено 18 видов амёб акантоподиального морфотипа, среди них доминируют представители рода *Acanthamoeba* (7 видов). Акантамебы - широко распространенный и наиболее типичный род почвенных амёб. Они встречаются и в верхних органогенных, и в нижележащих минеральных горизонтах почвенных профилей. Во всех почвах встречаются организмы морфотипа Branched, представители таксона *Leptomixa*. Голые амёбы отличаются небольшими и средними размерами (5-65 мкм), наибольшее количество обнаруженных видов находится в диапазоне 16-25 мкм. Небольшие размеры - характерная черта большинства почвообитающих амёб.

Кроме того, в образцах были обнаружены солёничники - организмы, не характерные для почвенных биотопов. Однако ввиду высокой влажности тундровых почв присутствие представителей пресноводной фауны закономерно.

Начальные и еще неглубокие исследования показали, что почвы тундр успешно колонизированы. Выявлены разнообразные и богатые сообщества, неоднородные по составу и численности в разных экологических нишах. Среди наблюдаемых видов большой процент редких и ранее не описанных для почв организмов, много новых видов.

**Взаимодействие почвенного криогенеза с вечной мерзлотой.** Ответственные исполнители: С.В.Губин, А.В.Лупачев. Ареной наиболее активного взаимодействия почвообразования с мерзлыми толщами является зона контакта сезонноталого слоя и кровли многолетнемерзлых пород. Эта зона в период максимального оттаивания профиля находится в талом состоянии и представляет надмерзлотный горизонт формирующейся почвы, а при недостаточной теплообеспеченности переходит на те или иные сроки в мерзлое состояние и рассматривается как элемент мерзлой толщи. Специфика строения и свойств мерзлотных почв, формирующихся при близком, 1 м, залегании вечной мерзлоты, определяется мерзлот-

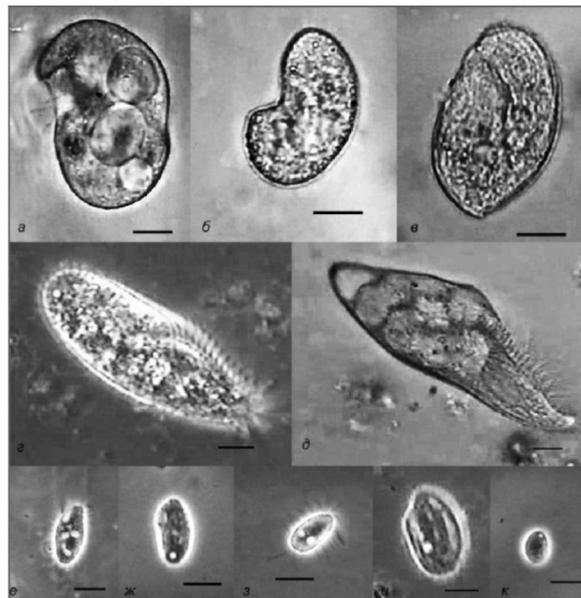


Рис. 14. Видовое разнообразие инфузорий: а - *Colpoda sp. 1*; б - *Colpoda inflata*, в - *Chilodonella sp.*; г - *Oxytricha sp.*; д - *Blepharisma aff.americanum*; е - *Cyrtolophosis mucicola* ж - *Colpoda sp.2*; з - *Cyclidium muscicola*; и - *Pseudomicrothorax aff.agilis* к - *Colpoda aff. aspera*

ным водоупором. Он ограничивает нисходящую миграцию продуктов почвообразования в растворах, а также материала, перемещающегося в профиле в ходе криогенного массообмена. В результате в низзах профилей формируются надмерзлотные горизонты. Для изучения имеющейся динамики границы «почва-мерзлота» и ее возможной трансформации в будущем сделан «инвентаризационный срез» состояния почвенного покрова на период МПГ на водораздельной поверхности междуречья рек Индигирка и Алазея (70° 00' с.ш., 153° 36' в.д.). Составлены детальные карты относительного превышения дневной поверхности и поверхности мерзлых пород.

Верхняя граница толщи мерзлоты находится в постоянной динамике. Многолетняя изменчивость глубин сезонного оттаивания ледового комплекса составляет 5-25 % мощности сезонноталого слоя в конкретный год. В периоды похолоданий происходят поднятия границы мерзлоты, и сформированные надмерзлотные горизонты почв могут переходить на длительные сроки в мерзлое состояние и представлять собой верхний слой мерзлоты, определяя его свойства. В периоды потеплений или повышенной теплообеспеченности, вызывающие увеличение глубин сезонного оттаивания, они вновь входят в деятельный слой, представляя надмерзлотные части почвенных профилей, характеризующих более ранние стадии формирования почв.

Среди процессов, определяющих строение минеральной части профилей почв тундровой зоны восточного сектора Российской Арктики и Субарктики, ведущее место отводится криотурбации и надмерзлотной ретинизации. Однако рельеф поверхности мерзлоты, состав и льдистость мерзлых

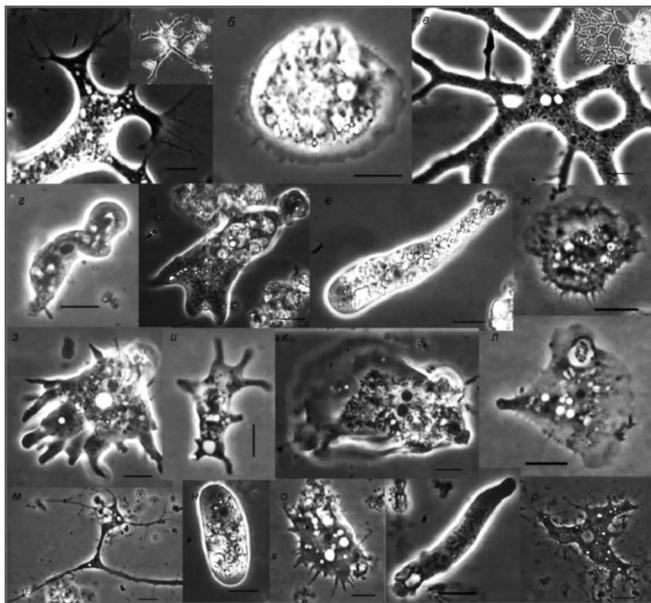


Рис. 15. Некоторые представители голых амоб, выявленные в мерзлотных почвах:

а - *Boomyxa* sp.; б - *Cochlopodium* sp.; в - *Leptomyxa* sp.; г - *Vahkampfa* sp.; д - *Mayoreh* sp.; ж - *fameh* sp.; з - *Rzamoebasp.*; и - *Korotnevelasp.*; л - *fameh* sp.; м - *Acramoeba* sp.; п - *Gsaeseria* sp.; е, к, н, о, р - неопределенные организмы

пород, изменение водного режима почв в период максимального оттаивания приводят еще и к слабо изученной масштабной латеральной миграции материала по поверхности мерзлоты, перераспределению его в почвенном наноконтакте и формированию мощных надмерзлотных горизонтов аккумуляции материала.

Перемещение материала идет с повышенных элементов кровли мерзлоты в пониженные участки мерзлотного нанорельефа. Изучение площадок с проявлением процесса латерального переноса по поверхности многолетней мерзлоты грубо органического материала в Колымской тундре показало, что уклоны наноповерхностей мерзлоты составляют в среднем 2-5°, а на отдельных участках достигают значений 12-13° и даже 20°. Наряду с хорошо выраженным нанорельефом поверхности мерзлоты и наличием исходного органического материала на наиболее поднятых его участках, активной миграции материала по поверхности кровли мерзлоты способствуют активно таяющий льдонасыщенный грунт и отток излишек надмерзлотных вод. Таяние льда на мерзлых наносклонах способствует отрыву и перемещению водонасыщенного торфа в подчиненные формы нанорельефа. Накопление торфа на границе мерзлоты меняет теплофизические свойства контактной зоны, снижает глубины сезонного оттаивания и ведет к постепенному переходу накапливающегося грубо органического материала в мерзлое состояние.

Потери от прокаливания органического материала из надмерзлотного горизонта составляют в среднем 20,2 %, при содержании общего углерода 4,7 %. В подстилающем переходном слое содержание гру-

бого органического материала выше, но с глубиной постепенно растет участие минеральных примесей. Зоны с абсолютным преобладанием органического материала (потеря от прокаливания до 62,5 %) перемежаются с участками, где они составляют 6,0 %, а содержание  $C_{org}$  3,2 %. Для переходного слоя с грубым органическим веществом средний показатель потери от прокаливания составил 31,0 %,  $C_{org}$  9,5 %.

На 12-13 % площади тундры, занятой криоземами с выраженным горизонтом латерального переноса в составе нанополигональных почвенных комплексов, подобное содержание органического углерода в надмерзлотных горизонтах профиля и переходном слое может рассматриваться как ранее практически не учитываемая статья стока и консервации  $C_{org}$  в ландшафтах тундр Северо-Востока России. С учетом площадей и объемов, занимаемых залегающими на границе почвы и мерзлоты органогенными прослоями, запасы органического вещества сопоставимы и даже превосходят таковые в верхних частях профилей формирующихся здесь почв.

Латеральный перенос водорастворимых веществ не ограничивается их перераспределением в почвенном наноконтакте. Когда максимальное оттаивание достигает льдонасыщенных надмерзлотных частей профиля, возрастает их обводненность, уровень формирующихся вод перекрывает неровности мерзлотного нанорельефа и идет миграция почвенных растворов за пределы комплексов с развитым нанорельефом. Активная разгрузка надмерзлотных вод, содержащих растворенное органическое вещество (1-3 мг/л) фиксируется в конце августа - середине сентября. Темные, из-за растворенных органических соединений, воды, разгружаясь в подчиненные формы релье-

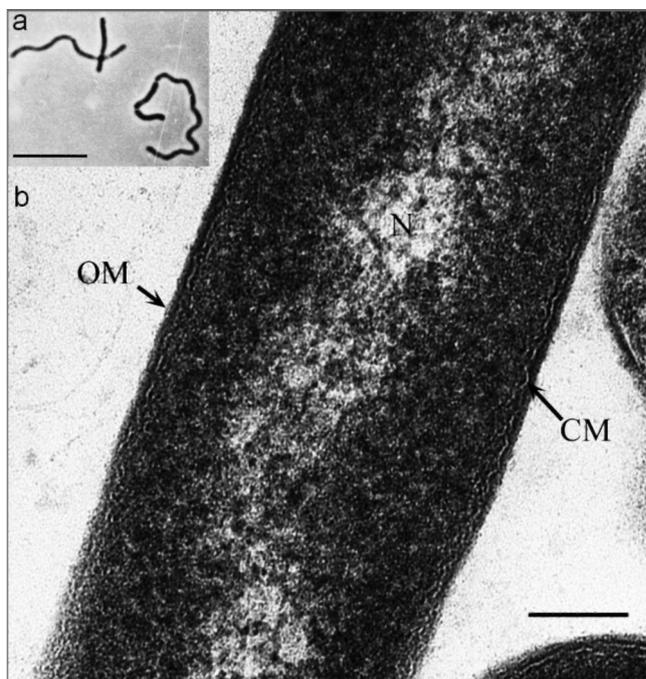


Рис. 16. Содержание органического вещества в многолетнемерзлых позднекайнозойских отложениях восточного сектора Арктики

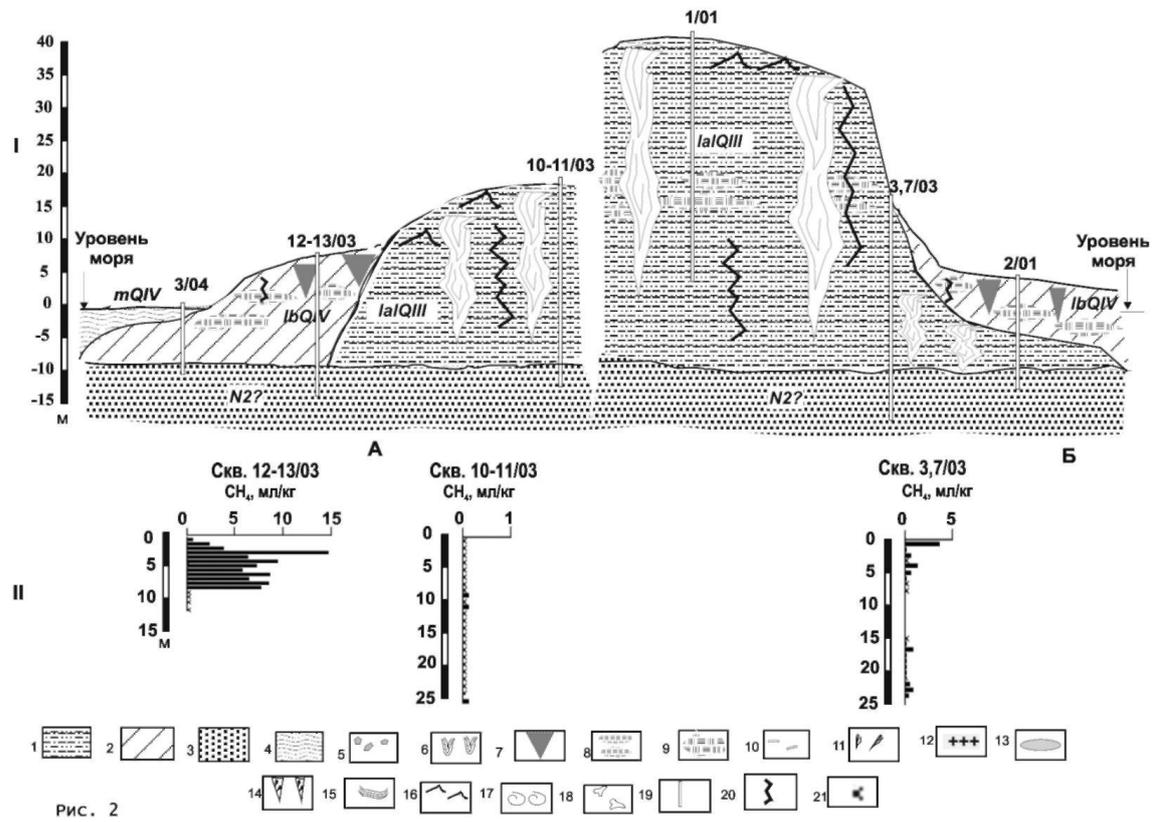


Рис. 17. Геологический разрез позднелайнозойских отложений мыса Быковский (I) и содержание метана в многолетнемерзлых породах (II). А - Ивашкина лагуна, Б - обнажение Мамонтова Хайата.

Условные обозначения: 1 - суглинок, 2 - песок, 3 - переслаивание супеси и песка, 4 - гравий, 5 - полигонально-жильный лед, 6 - жилы на аласах, 7 - торф, 8 - оторфованные горизонты и слои с растительными остатками, 9 - стволы деревьев, 10 - растительные остатки, 11 - погребенные почвы, 12 - линзы криопэггов, 13 - псевдоморфозы по полигонально-жильным льдам, 14 - литологическая слоистость, 15 - байджежи, 16 - морская фауна, 17 - палеонтологические находки, 18 - скважины, 19 - расчистки, 20 - точки опробования на газ с концентрацией метана <0,1 мл/кг.

фа, способствуют поднятию уровня местных рек и выносу из тундровых и северотаежных почв и ландшафтов не только органического вещества, но и других водорастворимых продуктов почвообразования.

**Парниковые газы в вечной мерзлоте.** Ответственные исполнители: Е.М.Ривкина, ГН.Краев. Проблема изменения климата под воздействием роста концентрации парниковых газов в атмосфере вышла сегодня на высокий научный и политический уровень. В последние десятилетия усилия ученых, как в нашей стране, так и за рубежом, направлены на измерение и выявление закономерностей эмиссии парниковых газов и изменение их концентрации в атмосфере. Большое внимание уделяется подсчету пулов этих газов в различных геоструктурах и экосистемах и построению моделей. Собрано огромное количество ежегодно пополняемых данных, на базе которых публикуются аналитические отчеты, суммирующие всю полученную информацию. Изучение газовых включений в ледяных ядрах Гренландии и Антарктиды показало, что содержание метана в атмосфере Земли в плейстоцене и голоцене колебалось от 0,35 до 0,7 ppm, будучи максимальным в периоды климатических оптимумов, включая голоценовый, и минимальным в криохроны, в том числе в период формирования позднелайноценового ледового комплекса. По мере роста насе-

ления Земли и активизации его деятельности, за последние 300 лет наблюдается более чем двукратное увеличение концентрации метана в атмосфере до 1,8 ppm.

Территории, занятые вечной мерзлотой, не обделены вниманием исследователей. В связи со значимостью высокоширотных территорий в образовании и эмиссии парниковых газов, с начала 90-х годов прошлого века стали появляться данные об эмиссии метана и углекислого газа с поверхности тундровых ландшафтов, где практически повсеместно возможны их образование и эмиссия. Как источник значительных потоков  $CH_4$  в атмосферу изучаются и донные осадки термокарстовых озер.

Эти важные исследования характеризуют лишь современные процессы, определяющие эмиссию парниковых газов. В наших исследованиях по ядру скважин опробованы на присутствие древних углеродсодержащих газов все стратиграфические горизонты позднего кайнозоя (верхние 100 м мерзлых отложений от дельты Лены до устья Колымы). Они содержат значительно больше углерода ( $CH_4$  и  $CO_2$ ), и эти газы, в отличие от глубинных газогидратов, потенциально способны легко высвободиться в атмосферу при деградации вечной мерзлоты, что сегодня наблюдается, например, при термоабразии берегов. Наряду с парниковыми газами, в мерзлых

толщах сохраняются лабильное органическое вещество (рис. 16) и жизнеспособные микроорганизмы. При оттаивании мерзлых толщ к почвам и донным осадкам добавляются еще два потенциально возможных источника эмиссии  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$  в атмосфере:

- древние метан и двуокись углерода плейстоцен-голоценового возраста, находящиеся в пассивном состоянии ниже слоя сезонного оттаивания.
- новообразованные парниковые газы (в связи с активизацией при оттаивании мерзлых пород, законсервированной в них биоты).

Проблема, на решение которой направлен проект, - отклик газовой компоненты криолитосферы на глобальные изменения природной среды. Исследования сфокусированы на метане, так как его эффективность как парникового газа более чем в 20 раз выше, чем  $\text{CO}_2$ . Конкретная конечная задача в рамках МПГ состояла в прогнозе дополнительного пула метана в атмосферу при деградации мерзлоты.

В восточном секторе Арктики метан повсеместно, в концентрациях от 0,2 до 40 мл/кг, присутствует в многолетнемерзлых эпикриогенных осадках: в коньковской (морской), олерской и томус-ярской свитах, в аласных и покровных горизонтах. В предельно низких концентрациях он иногда обнаруживается на сингенетически промерзающих современных поймах и отсутствует в разновозрастных синкриогенных ледовых комплексах и халарчинских песках. Распределение  $\text{CH}_4$  в сводном геологическом разрезе имеет вид сэндвича, где между эпикриогенными метаносодержащими толщами разного возраста расположены синкриогенные ледовые комплексы (средне- и верхнеплейстоценовый и современный), русловые и эоловые отложения, в которых метан отсутствует или присутствует в следовых количествах. Такое дискретное распределение сохраняется сотни тысяч лет. Факт, что метан за достаточно долгий, геологически значимый период времени не проник из вмещающих отложений в породы ледовых комплексов, указывает на отсутствие диффузии, что, в свою очередь, позволяет предположить, что метан находится в закрытых порах либо в клатратной форме. Таким образом, осадочный чехол в области многолетнемерзлых пород представляет собой огромный резервуар выведенных из современного биогеохимического круговорота газов, присущих только криолитосфере.

**Результаты сезонов 2007 и 2008 гг.** Получен новый материал о содержании  $\text{CH}_4$  в голоцен-позднеплейстоценовых отложениях Омолон-Аньюской едомы, примыкающей к горному обрамлению Колымской низменности при близком залегании коренных пород. На опорных разрезах ледового комплекса - устье р. Омолон и Дуванный Яр пробурено 8 скважин, вскрывших отложения ледового комплекса (едомной свиты) и аласных пачек. Скважины на высокой пойме р. Колымы прошли через пачку малольдистых старичных осадков, подстилаемую галечниками бегуновской ( $\text{N}_2$ ) свиты. В синкриогенном

позднеплейстоценовом (QIII) ледовом комплексе метан не был обнаружен, а в эпикриогенных аласных и озерных осадках присутствовал по всему разрезу скважин в концентрациях от 0,5 до 27,5 мл/кг.

Во ВСЕГЕИ определен изотопный состав углерода метана, отобранного как в результате дегазации керна, так и из ствола скважин. Полученные величины ( $\delta^{13}\text{C}$ ) $\text{CH}_4$  (-68,1/-86,0 ‰) однозначно указывают на биогенное происхождение газа и свидетельствуют, что значительная его часть экстремально обогащена легким изотопом  $^{12}\text{C}$ . Это связано с тем, что отложения, оттаявшие в период голоценового оптимума или под днищами озер, при последующем эпикриогенном промерзании долгое время находились в талом состоянии между надвигающимся сверху фронтом промерзания и подстилающей кровлей мерзлых пород. Околонулевые температуры способствовали низким скоростям биогенного метанообразования и, как следствие, значительному фракционированию изотопов углерода и обогащению вновь образованного метана изотопом  $^{12}\text{C}$ . Помимо этого, столь легкий изотопный состав говорит о том, что основными субстратами, из которых метаногены образовывали метан, были углекислый газ и водород ( $\text{CO}_2 + \text{H}_2$ ).

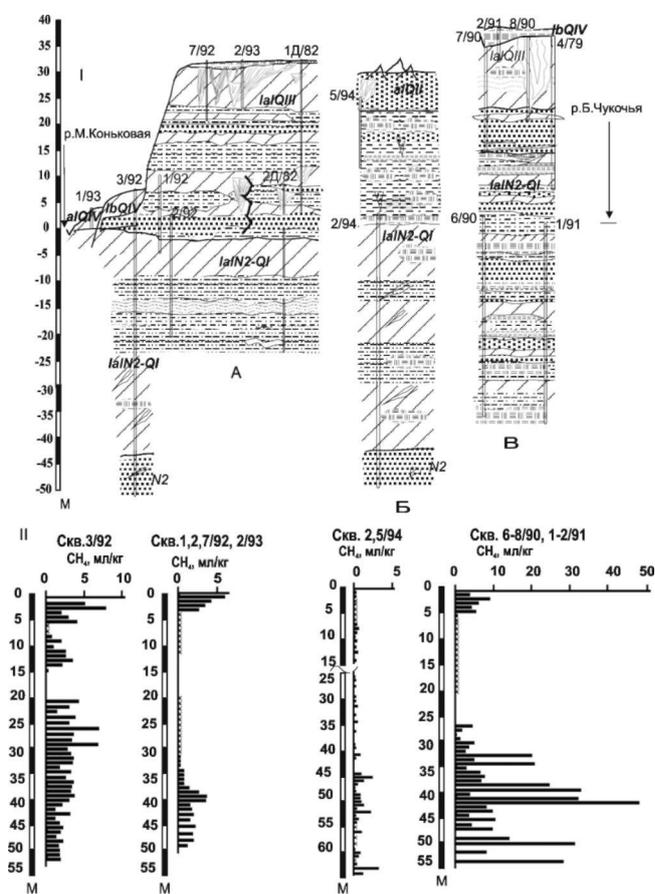


Рис. 6

Рис. 18. Геологический разрез позднекайнозойских отложений Чукотской едомы (I) и содержание метана в многолетнемерзлых породах (II): А - Коньковский борт едомы, Б-Г - Чукотский борт: Б - обнажение 21, В - обнажение 27, Г - обнажение 35 (по А.В.Шеру).

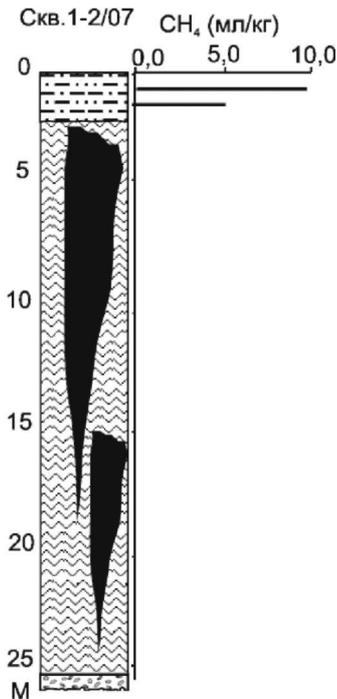


Рис. 19. Геологический разрез едомной свиты (позднеплейстоценового ледового комплекса) с отсутствием метана

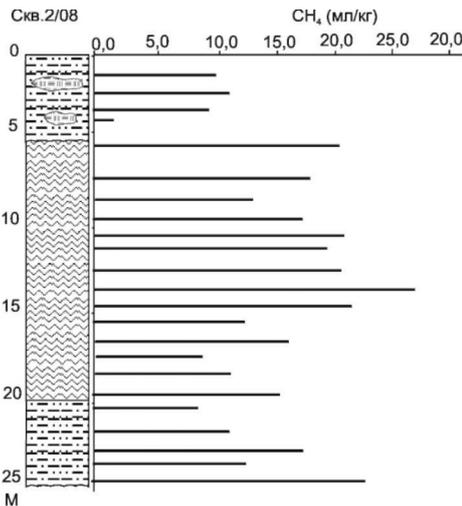


Рис. 20. Геологический разрез и распределение метана в голоценовых аласных отложениях

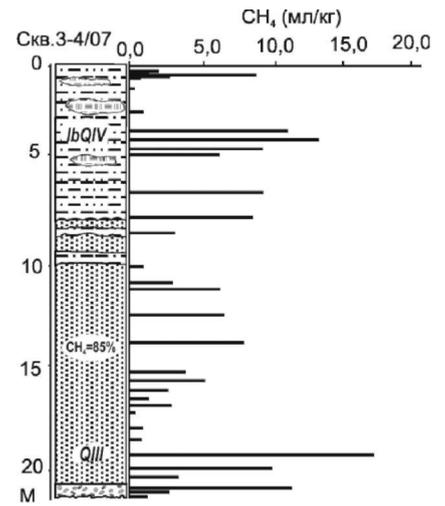


Рис. 21. Геологический разрез и распределение метана в старичных отложениях

Это подтверждает и впервые выделенная из мерзлых отложений чистая культура метанообразующей бактерии, в качестве основного субстрата для формирования метана использующая  $CO_2$  и  $H_2$ .

В последнее время нашими коллегами сделан вывод, что основным поставщиком органического вещества и метана являются позднеплейстоценовые отложения ледового комплекса. Статьи, опубликованные в престижных журналах (Science, Nature и др.), прогнозируют катастрофический пул метана в атмосфере при его оттаивании. Результаты наших комплексных исследований с охватом территории от Лены до Колымы этот прогноз не подтверждают. Во-первых, сам ледовый комплекс метана не содержит и его оттаивание даже потенциально не может привести к дополнительной эмиссии этого газа. Во-вторых, в ледовом комплексе не встречены метанообразующие бактерии, способные продуцировать метан при оттаивании пород. В-третьих, ледовый комплекс

и другие мерзлые толщи принципиально не отличаются по содержанию органического вещества и лабильной органики (рис. 16), которое могло бы использоваться в качестве субстрата для метанообразования.

На основе карты четвертичных отложений Хромо-Индибирского междуречья (1:1000000) и данных, полученных при изучении опорных разрезов и бурении, с помощью ГИС-технологий, составлена карта-схема геологического строения (~45000 км<sup>2</sup>) до глубин 30 м. Определены площади распространения и объемы основных стратиграфических горизонтов, содержащих парниковые газы. Среднее содержание метана в каждом типе отложений определялось по результатам дегазации более 250 проб, после чего была проведена оценка резервуарных газов территории. Расчеты показали, что само по себе высвобождение даже всего метана с этой площади, при оттаивании мерзлых толщ на глубину 30 м, значимого дополнительного пула в атмосферу не составит (рис. 23). В большей степени он будет определяться новообразованным в оттаявшей толще газом, в зависимости от условий, которые определяют биогеохимическую активность метанообразующих бактерий, и соотношением метанообразования с метанокислением.

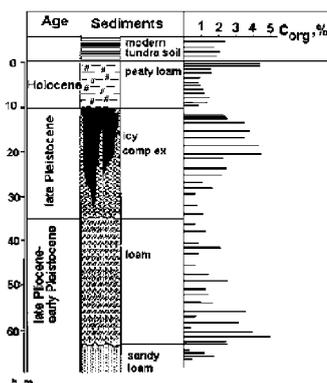


Рис. 22. Электронная фотография штамма МК-4 (*Methanobacterium veterum sp.*), выделенного из вечномерзлых отложений

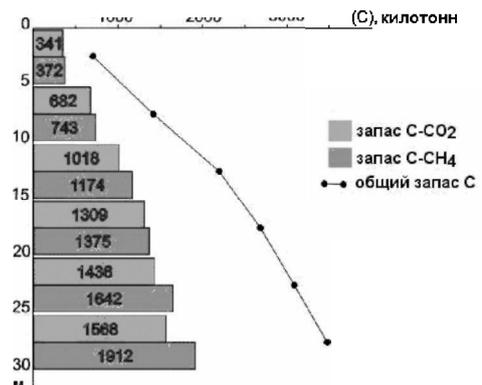


Рис. 23. Запас углерода ( $CO_2+CH_4$ ) в многолетнемерзлых отложениях Хромо-Индибирского междуречья на участке площадью 45000 км<sup>2</sup>