



Рис. 4. Альbedo (а) и температура поверхности (б) ледника Коллинз. Красная линия — западная граница ледникового купола

На основе данных ежегодных Российских антарктических экспедиций и результатов исследований, выполненных в рамках настоящего проекта и предшествовавших ему аналогичных проектов, подготовлен обзор состояния климата Антарктики. Он включает данные мониторинга природной среды Антарктики за последние

десятилетия, результаты многолетних наблюдений за скоростью аккумуляции снега на станции Восток, а также результаты реконструкции климатических изменений за последние 2000 лет по данным кернов мелких скважин.

*В.Я. Липенков, Н.Н. Антипов, О.А. Трошичев,
Б.В. Иванов, А.В. Клепиков (ААНИИ)*

ПОИСК АРКТИЧЕСКИХ БОБОВЫХ РАСТЕНИЙ И ИХ БАКТЕРИАЛЬНЫХ СИМБИОНТОВ В ДЕЛЬТЕ ЛЕНЫ И НА ПЛАТО ПУТОРАНА

Глобальное изменение климата, сопровождающееся повсеместным увеличением температуры, сильнее всего проявляется в полярных регионах Земли. В Арктике эти процессы сопровождаются постепенным увеличением глубины протаивания многолетнемерзлых пород и продолжительности периода вегетации, что ведет к существенной перестройке всей арктической экосистемы. Наблюдаемый эффект «позеленения» тундры сопровождается активным продвижением бореальных растительных сообществ на Север, вытеснением аборигенной флоры и заполнением новых экологических ниш. На таких территориях могут формироваться пастбищные фитоценозы, существенную часть которых составляют бобовые растения, вступающие в симбиотические взаимоотношения с азотфиксирующими клубеньковыми бактериями (ризобиями). Такая взаимовыгодная стратегия позволяет бобовым растениями осваивать новые территории благодаря широкой экологической пластичности и устойчивости к стрессовым факторам окружающей среды, одним из которых является низкое содержание азота в почве. Бобовые растения являются основным источником белка как для травоядных сельскохозяйственных животных, так и для диких северных оленей и овцебыков.

Изучение биоразнообразия клубеньковых бактерий, образующих азотфиксирующие клубеньки на корнях арктических пастбищных и дикорастущих бобовых растений, позволит дополнить спектр видов этих бактерий и создать уникальную коллекцию ризобий как ценного генетического ресурса для использования в сельском хозяйстве в экстремальных условиях Арктики. Изучение симбиотических взаимодействий арктических бобовых и клубеньковых бактерий позволит получить уникальные фундаментальные знания об адаптации растений и микроорганизмов к экстремальным почвенно-климатическим условиям Арктики для их последующего использования в восстановлении нарушенных земель,

а также для оценки сельскохозяйственного потенциала бобово-ризобияльного симбиоза при формировании высокопродуктивных пастбищных фитоценозов в северных регионах России.

С целью поиска и сбора вегетативной части, семян и корневых клубеньков северных дикорастущих бобовых растений были проведены две экспедиции, организованные Всероссийским научно-исследовательским институтом сельскохозяйственной микробиологии (ВНИИСХМ, Санкт-Петербург) совместно с Арктическим и антарктическим научно-исследовательским институтом (ААНИИ, Санкт-Петербург), в арктические заполярные регионы России.

Первая экспедиция в дельту реки Лены, на остров Самойловский (Республика Якутия (Саха)) состоялась в июле–августе 2021 года. Вторая экспедиция на плато Путорана (Красноярский край) была осуществлена в июле–августе 2022 года. Экспедиции были проведены в срок от начала цветения до созревания семян, чему способствовал короткий период вегетации бобовых в Арктике.

Методы и полевые исследования

Поиск, сбор и видовая идентификация бобовых растений проводились совместно с ботаниками Николаем Николаевичем Лащинским (Центральный Сибирский ботанический сад СО РАН) в дельте реки Лены, а также Игорем Николаевичем и Еленой Борисовной Поспеловыми (Институт проблем экологии и эволюции РАН и ФГБУ «Заповедники Таймыра») на плато Путорана.

Для всех собранных видов растений были собраны корневые клубеньки, пробы ризосферной почвы и семена растений. Клубеньки и семена хранили в чистых бумажных конвертах и сушили при комнатной температуре. Образцы почвы собирали в чистые пластиковые пакеты и хранили при +4 °C. Все образцы почв, семян и клу-

беньков были доставлены в лабораторию ВНИИСХМ для выделения клубеньковых бактерий и постановки микро-vegetационных опытов.

Район дельты Лены и окрестности Тикси

До отправления на научный стационар «Остров Самойловский» сбор клубеньков растений проводился на сопках бухты Тикси и в районе труднодоступного озера Севастьян-Кюеле. В этих же точках в конце экспедиции были собраны семена растений. Возможности и оснащенность исследовательской станции на о. Самойловский в дельте р. Лены (72° 22' с. ш., 126° 30' в. д), где в течение многих лет активно проводились совместные российско-германские исследования широкого научного спектра, позволили выполнить подробные ботанические исследования самого острова, а также различных частей дельты р. Лены — на островах Курунгнах-Сисе и Тит-Ары, на правом берегу р. Лены — в районе метеостанции им. Хабарова (Сокол) и в пойме реки Чинке.

Остров Самойловский расположен в южной части дельты реки Лены за Северным полярным кругом. В геоморфологическом отношении остров отчетливо делится на две части, различные по возрасту и генезису. На две трети остров занимает поверхность первой террасы, а одну треть в западной части острова составляет поверхность высокой поймы, подверженной сезонным подтоплениям речными водами.

Таблица 1

Список бобовых растений и количество клубеньков, собранных в ходе экспедиции «Лена-2021»

Видовая принадлежность	Кол-во популяций	Места сбора	Кол-во клубеньков
<i>Oxytropis nigrescens</i>	4	бухта Тикси озеро Севастьян-Кюеле остров Самойловский метеостанция им. Хабарова	96
<i>Astragalus norvegicus</i>	4	бухта Тикси остров Самойловский остров Курунгнах, гора Америка-Хая правый берег р. Лены, пойма р. Чинке	96
<i>Hedysarum arcticum</i>	4	озеро Севастьян-Кюеле остров Самойловский, терраса остров Курунгнах, гора Америка Хая-1 остров Курунгнах, гора Америка Хая-2	105
<i>Oxytropis adamsiana</i>	3	бухта Тикси озеро Севастьян-Кюеле остров Самойловский	85
<i>Astragalus umbellatus</i>	3	бухта Тикси остров Самойловский остров Курунгнах, гора Америка Хая-1	116
<i>Astragalus alpinus</i>	2	бухта Тикси остров Самойловский	62
<i>Astragalus frigidus</i>	2	остров Тит-Ары, терраса правый берег р. Лены, пойма р. Чинке	58
<i>Astragalus tugarinovii</i>	2	озеро Севастьян-Кюеле остров Курунгнах	41
<i>Oxytropis taimyrensis</i>	1	озеро Севастьян-Кюеле	48
<i>Oxytropis mertensiana</i>	1	бухта Тикси	65
<i>Oxytropis sordida</i>	1	правый берег р. Лены, метеостанция им. Хабарова	28
<i>Lathyrus palustris</i>	3	остров Самойловский, пойма-1 остров Самойловский, пойма-2 Тикси, дорога в порт	70
<i>Vicia cracca</i>	2	остров Самойловский, пойма-1 Тикси, дорога в порт	58

Поселок Тикси (71°38'12" с. ш. 128°52'04" в. д.) расположен на берегу одноименной бухты в южной части моря Лаптевых. Флора горная умеренно-арктическая.

Всего за период с 14 июля по 14 августа 2021 года было собрано 13 видов бобовых растений, относящихся к 5 родам (*Astragalus*, *Oxytropis*, *Hedysarum*, *Vicia* и *Lathyrus*) (табл. 1). По имеющимся литературным данным, на исследуемом участке дельты Лены произрастает около 20 видов бобовых растений (Лабутин Ю.В. и др. Флора и фауна дельты реки Лена. Якутск: ЯФ СО АН СССР, 1985. 140 с.). Таким образом, было найдено более половины всех видов произрастающих здесь бобовых. Для большинства видов были собраны две-четыре популяции из разных районов дельты реки Лены. Одиночные популяции были найдены только для таких видов остролодочника, как *O. taimyrensis*, *O. mertensiana*, *O. sordida*.

Популяции бобового растения чина болотная *Lathyrus palustris* на острове Самойловский были (совместно с Н.Н. Лацинским) обнаружены впервые. Ранее этот вид был описан только в поселке Тикси [Николин Е.Г., Якшина И.А. Внедрение бореальных элементов флоры в арктическую Якутию (пос. Тикси). Экологический вестник Северного Кавказа. 2017. Т. 13, № 3. С. 36–37]. Следует отметить, что представители чины и вики (мышинный горошек, *Vicia cracca*) являются заносными видами в этих районах, произрастающими в основном в низкой пойме реки, куда могли попасть с течением, или вдоль дорог около портовой территории, где происходит разгрузка судов.

Анализ образцов почв дельты реки Лены показал, что степень обеспеченности почв фосфатами и подвижным азотом варьировала от очень низких до высоких значений, а содержание гумуса варьировало от очень низких до средних значений. Результаты показывают, что в местах неглубокого протаивания мерзлоты наблюдается повышенное содержание гумуса и очень низкое содержание фосфатов и подвижного азота и, наоборот, в местах с более мощным сезонно-талым слоем содержание гумуса резко падает и повышаются значения фосфатов и азота. Это говорит о том, что в местах с маломощным сезонно-талым слоем почвенные микроорганизмы не успевают переработать органическое вещество, тем самым способствуя его накоплению. В местах с более глубоким сезонно-талым слоем почвенная микрофлора активнее включается в процессы разложения органики. Таким образом, бобовые растения *A. alpinus*, *O. adamsiana* и *H. arcticum* дельты реки Лены растут на контрастных по содержанию углерода, азота и фосфора почвах в условиях сезонных процессов оттаивания и промерзания многолетнемерзлых пород. В таких условиях формирование азотфиксирующего симбиоза с клубеньковыми бактериями играет важную роль для роста и продуктивности растений, их адаптации к среде обитания и конкуренции за экологическое пространство.

Изучение именно таких симбиотических систем, образующихся в экстремальных почвенно-климатических условиях, может иметь значение для создания высокопродуктивных пастбищных фитоценозов на арктических территориях России.

Плато Путорана и окрестности Норильска

Полевые работы 2022 года проводились в районе озера Дулук на территории заповедника «Путоранский» (ФГБУ «Заповедники Таймыра») в рамках договора о сотрудничестве с ВНИИСХМ в области научно-исследовательской деятельности и на основании разрешения

на посещение заповедника «Путоранский», а также в окрестностях Норильска и Талнаха. Поиск растений был проведен на основании данных о ботанических находках исследователей, изучавших эти районы в предыдущие годы, а также в результате собственной поисковой деятельности.

Озеро Дулук находится в труднодоступном месте в 250 км к востоку от г. Норильска, к северу от озера Аян, в северо-восточной части плато Путорана на реке Дулук (р. Некулякит), вдоль которой плато обрывается крутыми уступами (800 и более м). Территория самого плато находится в зоне субарктического пояса, на границе тайги и тундры. В районе озера характерна быстрая смена и чередование разнообразных ландшафтов: горные тундры расположены рядом с лиственничным редколесьем. На вершине плато находится зона арктических каменистых пустынь с небольшими участками ледников. Растительность представлена в основном лиственничными лесами до высоты 300–350 м, редколесьем и кустарниковой тундрой на верхних участках склонов и поверхности плато (начиная с высоты 500–700 м). Наиболее возвышенные части преимущественно занимает каменистая и лишайниковая тундра. Удивительный, интересный, но суровый край.

Результаты видовой идентификации собранных растений и количество найденных на корнях клубеньков представлены в табл. 2. В окрестностях озера Дулук были найдены и отобраны астрагал альпийский (*Astragalus alpinus*), астрагал холодный (*Astragalus frigidus*), астрагал норвежский (*Astragalus norvegicus*), остролодочник Адамса (*Oxytropis adamsiana*) и копеечник арктический (*Hedysarum arcticum*). Особые условия произрастания были характерны для нескольких видов. Так, эндемичный

Таблица 2

Список бобовых растений и количество клубеньков, собранных в ходе экспедиции «Путорана-2022»

Видовая принадлежность	Кол-во популяций	Место сбора	Кол-во клубеньков
<i>Oxytropis adamsiana</i>	4	Талнах, Красные камни-1 Талнах, Красные камни-2 Талнах, Красные камни-3 озеро Дулук, 1-я осыпь	64
<i>Hedysarum arcticum</i>	2	Талнах, Красные камни берег озера Дулук	34
<i>Astragalus frigidus</i>	2	Норильск, пляж озера Долгое берег озера Дулук	65
<i>Oxytropis czekanowskii</i>	2	карьер севернее Талнаха Норильск, у храма	23
<i>Oxytropis putoranica</i>	2	берег верхнего Дулука Дулук, осыпь перед вершиной	38
<i>Oxytropis karga</i>	1	север Талнаха, пойма ручья	6
<i>Astragalus norvegicus</i>	1	берег озера Дулук	56
<i>Astragalus alpinus</i>	1	берег озера Дулук	34
<i>Astragalus tugarinovii</i>	1	озеро Дулук, 2-я осыпь	31
<i>Oxytropis nigrescens</i>	1	вершина плато на левом склоне верховья Дулука	24
<i>Oxytropis mertensiana</i>	1	луг перед вершиной плато на левом склоне верховья Дулук	39
<i>Oxytropis tichomirovii</i>	1	берег озера Дулук	16
<i>Astragalus schelichowii</i>	1	Норильск, мечеть	29
<i>Vicia cracca</i>	2	Норильск, около мечети Норильск, Валёк	24
<i>Lathyrus pratensis</i>	1	Норильск, Валёк	23
<i>Trifolium repens</i>	1	Норильск, Валёк	40



Остролодочник путоранский с бобами и семенами



Корневая система и клубеньки остролодочника путоранского



Остролодочник Адамса



Остролодочник Мертенса



Обильное цветение копеечника арктического (*Hedysarum arcticum*) в пойме перед станцией

вид остролодочник путоранский (*Oxytropis putoranica*) рос на каменистых осыпях выше озера на высоте 700–800 м над уровнем моря, но отдельные растения были найдены также вдоль сухих русел стекающих ручьев. Растение образует красивые довольно крупные подушки, почти белые из-за обильного серебристого длинномохнатого опушения. Остролодочник Мертенса (*Oxytropis mertensiana*) был найден только в одном месте — на влажном лугу перед самой вершиной плато (около 800 м над уровнем моря). Многочисленные растения остролодочника чернеющего (*Oxytropis nigrescens*) росли только на самой вершине плато. Интересные образцы были собраны также в самом Норильске и в окрестностях Талнаха (табл. 2).

На корнях растений из всех обнаруженных популяций бобовых были найдены симбиотические клубеньки. Их количество существенно варьировало в зависимости от вида растения (табл. 2). Состояние клубеньков также различалось, встречались молодые, зрелые, старые и отмершие (вероятно, прошлогодние) клубеньки. На фотографиях в качестве примера показан внешний вид остролодочника путоранского с бобами и семенами, его корневой системы и клубеньков в процессе выкапывания растения. Также показан внешний вид растений остролодочника Адамса и остролодочника Мертенса.

Результаты агрохимических анализов собранных образцов почв выявили значительную вариабельность по кислотности, содержанию фосфора и калия и азотистых соединений. Эти данные в дальнейшем будут использоваться для обсуждения и интерпретации результатов по биоразнообразию селектированных штаммов клубеньковых бактерий и их свойств.

Таким образом, в результате двух экспедиций был собран обширный биологический материал в виде гербария, семян и клубеньков арктических бобовых, а также образцы почв в местах произрастания этих видов растений. Собранный материал служит уникальным ресурсом для дальнейших экспериментов в лабораторных условиях, направленных на характеристику биоразнообразия клубеньковых бактерий и эволюции азотфиксирующего симбиоза. Так, клубеньки служат для выделения и изучения таксономического разнообразия клубеньковых бактерий бобовых растений. Выделенные штаммы будут детально охарактеризованы, изучены их культуральные

и физиологические свойства и идентифицированы различными генетическими методами. В результате впервые будет создана уникальная коллекция клубеньковых бактерий арктических бобовых растений, произрастающих в дельте реки Лены и на плато Путорана. Высока вероятность описания новых видов симбиотических бактерий. Штаммы будут депонированы в Ведомственной коллекции полезных микроорганизмов сельскохозяйственного назначения (ФГБНУ ВНИИСХМ, Санкт-Петербург). В дальнейшем клубеньковые бактерии будут использованы для изучения становления специфичности и механизмов межмолекулярного взаимодействия клубеньковых бактерий и бобовых растений в ходе эволюции их симбиоза.

Важно отметить, что экспедиции были бы невозможны без содействия и помощи многих наших коллег. Так, мы особо благодарны ботаникам д-ру биол. наук Николаю Николаевичу Лащинскому и канд. биол. наук Игорю Николаевичу и д-ру биол. наук Елене Борисовне Поспеловым за помощь в сборе и идентификации бобовых и ценные советы. Выражаем благодарность руководству и координаторам экспедиции «Лена-2021» за прекрасную организацию и проведение экспедиции, а также коллективу научной станции на острове Самойловский, руководству заповедника «Усть-Ленский» и особенно Федору Селяхову за предоставление транспорта и комфортных условий проживания, что положительно сказалось на выполнении исследовательских задач.

Огромную благодарность выражаем администрации ФГБУ «Заповедники Таймыра» и особенно Н.Ю. Афанасову за неоценимую помощь в организации экспедиции. Участники группы впервые посетили плато Путорана и были покорены его уникальностью и суровой красотой, а озеро Дулук и его окрестности навсегда останутся в их памяти как одно из самых красивых мест.

Научные работы выполнялись в рамках проекта РНФ № 20-76-10042 конкурса «Проведение исследований научными группами под руководством молодых ученых».

*И.А. Алехина (ААНИИ),
А.А. Белимов, Д.С. Карлов (ВНИИСХМ).
Фото И.А. Алехиной*