

Сведения о выполненных работах  
в период с 01.07.2018 г. по 30.06.2019 г.

по проекту **«Биогеохимическое изучение феномена высокой биологической продуктивности растительности в условиях Субарктики как основа для создания технологий природообустройства в Арктической зоне Российской Федерации»**,

поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 18-77-10045

Руководитель: канд. биол. наук Лойко Сергей Васильевич

В рамках полевых работ в летний сезон 2018 года проводили исследования в пределах ключевых участков в южной тундре (КУ «Тазовский») и северной тайге (КУ «Ханымей»). Основной КУ «Тазовский» располагается в северной части Пур-Тазовского междуречья (Западно-Сибирская равнина), неподалёку от посёлка Тазовский.

В пределах КУ «Тазовский» в районе котловин осушенных озёр изучались биогеохимические особенности высокопродуктивных экосистем. Также проводились гидрохимические исследования в фоновых интразональных ландшафтах - полигональные болота и поймы рек, с целью получения сравнительного материала. Основные работы выполнены в пределах 8 котловин осушенных термокарстовых озёр (хасыреев), приуроченных к 3-й надпойменной озерно-аллювиальной террасе р. Таз (высоты над уровнем моря составляют 30-40 м). В ходе работ охвачены хасыреи различного возраста и степени осушения. В хасыреях заложено 148 исследовательских точек (в том числе и на остаточных водоёмах), охватывающих основные микроландшафты с необходимой повторностью и выбранные на основании предварительного изучения космических снимков, а также маршрутных наблюдений. На выбранных точках производили исследования различной степени детальности: от базового отбора проб поверхностных и почвенных вод с измерением мощности сезонно-талого слоя (GQ, до полного набора исследований (гидрохимические, почвенные, геоботанические) в типичных экосистемах котловин дренированных озёр. Проводили бурение старого хасырея и полигональных болот для отбора образцов мерзлого торфа и озерных отложений, для дальнейшего получения талой воды, а также элементного анализа твердой фазы.

Целью заложения второго КУ «Ханымей» был поиск высокопродуктивных травяных и травяно-кустарниковых экосистем в северной тайге, с целью планирования детальных работ в последующие годы выполнения проекта. Были проведены маршрутные исследования в поймах малых и средних рек, а также в частично осушенных озёрных котловинах. В ходе проведенных рекогносцировочных работ было обследовано 4 котловины частично дренированных озёр. В этих котловинах остаточные водоёмы сохраняются в центральной области. Две котловины дренированы несколько тысяч лет назад, поэтому на большей части остаточных

водоёмов успели сформироваться сплавины. Третья котловина осушена около 800 лет назад, а четвертая около 30-40 лет назад.

Суммарно отобрано 150 проб почвенных и поверхностных вод. Воды, отобранные для элементного анализа, немедленно фильтровали через одноразовые ацетат-целлюлозные фильтры Sartorius (диаметр 33 мм, размер пор 0,45 мкм). В пробах вод измерялись: растворенные  $\text{CH}_4$  и  $\text{CO}_2$ , электропроводность, растворенный кислород, pH, спектральные характеристики, DIC, DOC,  $\text{I}^{13}\text{C}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ , Cl,  $\text{SO}_4$ , содержание химических элементов (Li, B, Na, Mg, Al, Si, P, K, Ca, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, Ga, Ge, As, Rb, Sr, Y, Zr, Nb, Mo, Cd, Sb, Te, Cs, Ba, La, Ce, Pr, Nd, Sm, Eu, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu, Hf, Ta, W, Tl, Pb, Th, U). Определение содержания основных макро- и микроэлементов в воде выполняли на квадрупольном ICP-MS (7500ce, Agilent Technologies) в GET лаборатории обсерватории Миди-Пиринейз (Тулуза, Франция). Температура воды, pH, растворенный кислород и удельная проводимость измерялись в полевых условиях с помощью портативных приборов WTW. Для определения концентраций  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в воде пробы отбирались в стеклянные 25-мл пробирки и фиксировались  $\text{HgCl}_2$ . Измерения производили на анализаторе Bruker SCION 456-GC в Томском государственном университете с неопределенностью 3 и 5% соответственно. Основные концентрации анионов ( $\text{Cl}^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ ) были проанализированы методом ионной хроматографии (Dionex 2000i) с неопределенностью 2%. Растворенный органический углерод (DOQ) и растворенный неорганический углерод (DIQ) были определены, используя анализатор Shimadzu TOC-VSCN с неопределенностью 3% и пределом обнаружения 0,1 мг/л, УФ-поглощение измеряли с шагом в 1 нм. Измерения потоков  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  проводились с использованием пластиковых камер диаметром 30 см, оборудованными логгерами с неразрушающим инфракрасным датчиком (ELG, SenseAir). Всего измерения были проведены в 22 точках в 3-х кратной повторности.

70 проб отобрано с использованием почвенных керамических лизиметров фирмы SDEC (Франция). Это позволило для ряда точек провести отбор проб по глубинам. Что важно для понимания различия в гидрохимических параметрах корнеобитаемого горизонта с залегающим глубже, а также разницы между олиготрофными торфами и озерными отложениями в старых хасырях. В 66 пробах воды изучалась низкомолекулярная фракция растворенных компонентов методом центробежной ультрафильтрации на месте с использованием одноразовых картриджей Amicon Ultra 15 (полезный объем 15 мл; 3,5 кДа). В этих пробах измеряли все перечисленные химические элементы, а также DOC и спектральные характеристики. Величины содержания элементов в этих фракциях косвенно свидетельствует об их биодоступности.

Отобрано 24 пробы воды в пойме реки Таз и поймах его притоков, а также 33 пробы воды в полигональных болотах. В отобранных пробах также определяли перечисленные выше параметры вод. В пойме реки Таз заложено 8 почвенных разрезов, из которых отобрано 36 образцов почв.

Определен видовой состав растений хасыреев. На 124 участках выполнены геоботанические описания. Запасы надземной биомассы определяли для 60 экосистем без кустарников и кустарничков. Укосы делали на площадках 20x20 см в 3-х кратной повторности. На этих же точках отобрали пробы для определения подземной биомассы. Подземную биомассу измеряли в основных типах экосистем хасыреев (12 точек). Химический состав растений определяется с использованием метода ICP-MS (на масс-спектрометре Agilent-7700х).

В пределах исследованных участков почвы изучались в 43 экотопах. Всего отобрано 177 образцов. В образцах почв определяются следующие показатели: влажность, потеря при прокаливании, гигроскопическая влага, зольность, обменные основания, гидролитическая кислотность, рН водный, рН солевой, Р водный, окраска в системе CIE L\*a\*b и Манселла, валовые углерод и азот, нитратный азот, подвижный калий и подвижный фосфор, обменный аммоний. Все анализы выполняются по стандартным методикам. Анализ азота и углерода в почве выполнен на приборе Thermo Flash 2000 NS Soils. Окраска почвенных образцов измерена на приборе X-Rite VS450. Валовый элементный состав определялся методом ICP-MS. В образцах определено содержание изотопа  $^{13}\text{C}$  и  $^{15}\text{N}$ .

Для изученных старых хасыреев определено время дренажа их озерных котловин путём радиоуглеродного датирования слоёв торфа травяно-топяного типа, залегающего под пушицево-осоково-сфагновым торфом. На прилегающих полигональных болотах датировано время формирования 7 просадок с целью выявления времени активизации термокарстовых процессов, для целей последующей корреляции с временем осушения термокарстовых озёр (получено 24 даты в радиоуглеродной лаборатории ИМКЭС СО РАН, г. Томск). На границе озёрных отложений и топяного торфа в старых хасыреях найдены окатанные угольки. Найденные угли, а также образцы из торфяных горизонтов, переданы для AMS датирования в лабораторию г. Познань (Польша).

Для определения стадий хасыреев в пределах исследуемого района, с целью подсчёта их площади и составления карты распространения, проведена обработка данных NDVI с космических снимков Sentinel-2B, полученных через EO Browser. А также снимков Landsat, с целью выявления времени дренажа самых молодых термокарстовых озёр. Для всех изученных хасыреев составлены карты-схемы основных экосистем. Для этого использованы общедоступные ресурсы Google Maps и Яндекс Карты, по которым производилась привязка, а актуализация данных выполнена с использованием съемки с квадрокоптера DJI Phantom, а также космических снимков Sentinel-2B. Необходимость актуализации данных связана с высокой динамичностью рельефа хасыреев молодых и средних стадий. Проведен анализ разнообразной дистанционной информации по северу Западной Сибири с целью выбора объектов полевых исследований летом 2019 года, а также выявления пойм и дренированных озёр с высокопродуктивными экосистемами.

Получены первые биогеохимические материалы по изученным хасыреям, оценена вариабельность рассматриваемых параметров, их взаимосвязи, отличия от

фоновых интразональных болотных ландшафтов. Установлено, что максимальный поток CO<sub>2</sub> наблюдается в молодом хасырее и составляет 1,28 г С/м<sup>2</sup>/д, в то время как в старом хасырее этот показатель почти в 7 раз меньше (0,19 г С/м<sup>2</sup>/д). Концентрация растворенного CO<sub>2</sub> в молодом хасырее составляет 893 мкмоль/л, что в 4 раза меньше по сравнению со старым. Эмиссия метана, наоборот, больше в старом хасырее и составляет 0,021 г С/м<sup>2</sup>/д, что в 3 раза больше по сравнению с молодым хасыреем. Одной из особенностей химии почв и поверхностных вод в осушенных озерных экосистемах является довольно большие горизонтальные вариации в химическом составе жидкостей (в пределах нескольких метров). Вертикальная вариация концентраций элементов в почвенных поровых водах выражена еще сильнее, особенно в старых хасыреях. Так концентрация в твердой фазе таких элементов, как P, Ca, Mn, K, Si уменьшается в десять раз от бывших озёрных отложений к корнеобитаемому олиготрофному торфу, аналогично поведение элементов и в почвенном растворе. Горизонтальная вариабельность в старых хасыреях снижается.

Получены оценки изменения гидрохимии поровых вод, растительности, почв и их свойств, биопродукции в зависимости от эволюционной стадии хасырея. Поверхностные воды (в депрессиях, просадках и остаточных водоемах на дне осушенной котловины) молодых хасыреев обогащены основными микроэлементами, по сравнению со старыми хасыреями. Молодые хасыреи значительно (>30%) обогащены многими основными и подвижными неорганическими питательными веществами по отношению со старыми хасыреями. Поверхностные и почвенные воды молодых хасыреев обогащены в 2 и более раза DIC, Na, Mg, B, Si, K, P, Mn, Zn, Co, Ni, Cu, Mo, Rb, Ba, по сравнению со старыми хасыреями. В старых хасыреях выше значения SUVA, DOC, V, Zr, Th. pH и средние концентрации DOC, DIC, Mg, Ca, Si, K, Al, Fe, Mn, Co и Ni в молодых и старых хасыреях, окружающих болота и термокарстовых озерах иллюстрируют увеличение показателей pH, электропроводности, Na, Mg, Ca, Si, P, Mn, Co, Ni, в ряду молодой хасырей > средний хасырей > старый хасырей ≥ полигональные болота ≥ термокарстовые озера.

На основе анализа торфяного льда КУ «Тазовский» установлено, что концентрации PO<sub>4</sub>, Na, K, Mg, Ca, Al, Fe в водах СТС и торфяном льду существенно различаются. Так PO<sub>4</sub>, Mg и Ca во льду многолетнемерзлого слоя содержится на порядок больше, чем в верховодке СТС, Na и K больше в 2 раза, а Al и Fe в 5 раз. Причиной низких концентраций элементов в почвенных водах СТС является разбавление атмосферными осадками, подверженность процессам трансформации ОВ микробными сообществами, процессами фотодеструкции и минерализации. При постоянном воздействии этих процессов происходит выщелачивание элементов из торфа. Рассматриваемые элементы в полном профиле торфяной залежи имеют элювиально-аккумулятивное распределение концентраций, причем пик аккумуляции расположен ниже границы мерзлоты со смещением с несколько десятков см. На полигоне аккумулятивный пик расположен ближе к поверхности, чем в мочажине. Различие глубин залегания этих пиков связано с тем, что граница ас на полигоне находится в среднем на 20-30 см ближе к поверхности болота. Отметим, что средняя концентрация PO<sub>4</sub> торфяном льду мерзлоты полигона выше в 3 раза, чем в мерзлоте

мочажины. Вероятно, это связано с тем, что через мочажину проходит сток воды, с которым происходит вынос элементов. Колонка льда, проанализированная в заболоченном экотопе старого хасырея показала схожие закономерности. Однако аккумулятивные пики более сглаженные, видимо они ещё не успели столь явно оформиться. Выявленные запасы элементов играют большую роль в качестве источников элементов для озерных котловин. Данный пул обогащает донные отложения и водную толщу озёр при береговой абразии. При усилении процессов таяния мерзлоты может происходить обогащение внутрпочвенного стока.

Для оценки влияния гидрохимии вод на растительные сообщества был предложен и рассчитан балл трофности. Установлено, что наиболее благоприятные условия трофности складываются в сообществах арктофилы. Минимумы соответствуют экотопам, где арктофила уже потеряла доминантные позиции. Результаты проведенного PCA анализа показали сильную связь между химизмом почвенных вод и сообществами с доминированием арктофилы, вейника, осок (наибольший вклад в связь у щелочно-земельных металлов и гидрокарбонатов).

В обследованных хасыреях Пур-Тазавекого междуречья встречено 46 видов сосудистых растений и 32 вида мхов. В хасыреях молодой стадии 36% сосудистых растений уникальны. В средних и старых этот процент составляет 37 и 66%, соответственно. В молодых хасыреях нет каких-то специфичных мхов. Все встреченные в молодых хасыреях мхи были найдены и в других котловинах, относящихся к более поздним стадиям. Количество уникальных видов мхов в средних хасыреях составило 31%, а в старых - 47%. Все изученные хасыреи по состоянию растительности и давности дренажа разделены на молодые, средние и старые. Пионерными видами, колонизирующими озерное дно, являются *Arctophila fulva*, *Carex rostrate*, *Tephrosia palustris* на богатых нутриентами субстратах. На более бедном субстрате поселяются *Carex aquatilis*, *Carex acuta*, *Eriophorum polystachyon*, *Eriophorum scheuchzeri* и *Equisetum fluviatile*. На береговых склонах разрастаются ивы. Самое высокое значение надземной чистой первичной продуктивности в 2538 г/м<sup>2</sup> зафиксировано для луга из *Arctophila fulva* в центральной области молодого хасырея. Среднее значение продуктивности этих лугов составило 1123±824 г/м<sup>2</sup>. По мере агградации мерзлоты в озерном бассейне формируется микрорельеф, молодой хасырей превращается в средний. В среднем хасырее на мерзлотных буграх доминирует *Calamagrostis langsdorffii*. Луга с его участием имеют среднюю продуктивность в 927±417 г/м<sup>2</sup>. Реже на буграх растёт *Salix* spp. В мочажинах между буграми распространены луга из *Carex aquatilis* со средней продуктивностью 780±657 г/м<sup>2</sup>. С течением времени в средние хасыреи внедряются сфагновые мхи (*Sphagnum obtusum*, *Sphagnum squarrosum*). Происходит формирование торфяного горизонта, резко падает продуктивность растений. В старых хасыреях на травяные виды приходится на порядок меньше продукции, чем в молодых. Средняя продуктивность осок и пушиц в топях составила 79±22 г/м<sup>2</sup>. Большая часть старых хасыреев представляет из себя мерзлые болота. Со временем дренированные бассейны превращаются в мерзлые болота с преобладанием топей из пушицы, осок и сфагнумов, среди которых на повышениях произрастает тундровая растительность.

Потепление климата активизирует термокарстовые процессы в Арктике, такие как усиление береговой абразии в озёрах тундры, увеличение частоты осушения озёр, что приводит к увеличению площади хасыреев. Для исследованной территории Пур-Тазавекого междуречья установлена тенденция ступенчатого сокращения площади отдельных озёр, их полное или частичное исчезновение. По мере спуска воды на обнаженном дне появляется травяная растительность, продуктивность и видовой состав которой кардинально отличается как от фоновых зональных, так и интразональных болотных экосистем. По мере развития в новом супераквальном режиме происходит обеднение почв элементами минерального питания, продуктивность сообществ падает, начинается протекать эндоэкогенетическая сукцессия, на которую накладывается формирование микрорельефа. По результатам чего относительно однородные супераквальные группировки растительности делятся на неоавтоморфные с мерзлотными почвами на буграх и супераквальные у подножия бугров. В дальнейшем бугры могут вновь проседать, а территория колонизируется олиготрофной растительностью, в результате чего происходит гомогенизация геохимических микроконтрастов, выравнивание микрорельефа и сближение характера почвенно-растительного покрова с зональной матрицей тундровых автономных и гетерономных микроландшафтов.