

Сведения о выполненных работах
в период с 27.07.2023 г. по 30.06.2024 г.

по проекту **«Факторы контролирующие биогеохимические процессы и цикл углерода в экосистемах озер меридионального профиля Западной Сибири: построение концептуальной модели»**,
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 21-77-10067

Руководитель: Манасыпов Ринат Мратович, канд. биол. наук

На третьем этапе проекта, были завершены аналитические работы, проведена камеральная пробоподготовка и биогеохимические анализы полевых образцов. Получены недостающие данные об элементном составе озерных вод и поровых вод донных отложений, основных анионах и короткоцепочечных жирных кислот, что позволило выявить особенности их пространственного изменения в пределах ключевых участков и на меридиональном профиле Западной Сибири. Описано распределение стабильных изотопов кислорода, водорода, углерода и азота в донных отложениях термокарстовых озер и в поровых водах донных отложений меридионального профиля Западной Сибири. Проведено радиоуглеродное датирование донных отложений ключевых изученных термокарстовых озер. Изучены процессы окисления метана и производства углекислоты в донных отложениях термокарстовых озер, как одного из ключевых звеньев углеродного цикла. Выполнена логико-интерпретационная и экспертная обработка полученных материалов включающая синтез большого набора данных, полученных в результате выполнения проекта, а также ранее полученных коллективом исполнителей научных результатов по тематике проекта.

Для анализа стабильных изотопов кислорода, водорода и $\delta^{13}\text{C}$ -DOC поровых вод и ^{13}C и ^{15}N донных отложений, были изучены четыре термокарстовых озера разных зон распространения многолетней мерзлоты. При продвижении на юг в поровых водах происходит утяжеление изотопного состава водорода от -100‰ в зоне сплошного распространения мерзлоты до $-80,4\text{‰}$ в зоне изолированной мерзлоты. Изотопный состав кислорода имеет аналогичную динамику и изменяется от -12‰ на севере до $-7,7\text{‰}$ в южных районах исследования. Значение избытка дейтерия показало, что формирование изотопного состава поровой воды в южных районах криолитозоны происходило в более теплых условиях. Средние значения $\delta^{15}\text{N}$ для озер зон изолированной, спорадической, прерывистой и сплошной мерзлоты составили $0,94\text{‰}$, $0,83\text{‰}$, $0,31\text{‰}$ и $1,28\text{‰}$, соответственно. Это может говорить о более автохтонных источниках ОВ в данных зонах, что, вероятно, связано с увеличением показателя pH озерных вод и образованием автохтонного РОВ посредством фотосинтеза фитопланктона и перифитона, что также подтверждается спектрофотометрическими исследованиями качества растворенного органического вещества поровых вод. Так, было выявлено, что максимальные значения [POU], SUVA, ароматичности и WAMW характерны для зоны спорадической/прерывистой

мерзлоты, которая является наиболее активным фронтом деградации мерзлоты в Западной Сибири. Это может быть объяснено несколькими причинами. Во-первых, в этой зоне из-за максимальной мощности активного слоя поступление торфяных фильтратов из древних мерзлых торфяников в надмерзлотные воды и далее в озеро происходит наиболее активно. Во-вторых, значительно более высокие значения pH в зонах изолированной и сплошной мерзлоты по сравнению со спорадической/прерывистой зоной могут привести к автохтонному производству РОУ посредством фотосинтеза фитопланктона озерной воде, и перифитона в подводных субстратах и озерных отложениях. Наконец, наблюдались повышенные значения E2:E3, S275–295, SR в зонах изолированной и сплошной мерзлоты и более низкие значения в зонах спорадической/прерывистой мерзлоты. В целом это подтверждает активное поступление терригенного РОВ с преобладанием ароматического органического углерода в поровые воды донных отложений термокарстовых озер, расположенных в зоне спорадической/прерывистой мерзлоты. При дальнейшем изменении климата можно ожидать значительного увеличения качества РОВ, снижения молекулярной массы и увеличения потенциальной биодоступности в озерах зоны спорадической/прерывистой многолетней мерзлоты, тогда как РОВ в поровых водах озер, расположенные в зоне сплошной мерзлоты, могут испытывать обогащение ароматическими соединениями с более высокой молекулярной массой и, следовательно, с более низкой потенциальной биодоступностью.

Впервые для территории исследования экспериментально оценен потенциал аэробного окисления CH_4 и продукции CO_2 на основе закачки меченого ^{13}C - CH_4 в микрокосмы с донными отложениями разной глубины залегания (0–10 и 10–20 см) из малого (~300 м²), среднего (~3000 м²) и большого (~1 км²) термокарстового озера зоны спорадической/прерывистой мерзлоты Западной Сибири. Продукция CO_2 в верхних слоях отложений была в 1,4–3,5 раза выше, чем на глубине 10–20 см, и возрастала от крупного (158 ± 18 нмоль $\text{CO}_2 \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$) до среднего и малого (192 ± 17 нмоль $\text{CO}_2 \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$) термокарстовых озер. Окисление метана в верхних слоях отложений было одинаковым во всех озерах, тогда как в нижнем слое большого озера скорость окисления метана была в 14 и 74 раза выше ($5,1 \pm 0,5$ нмоль CH_4 -производного $\text{CO}_2 \cdot \text{г}^{-1} \cdot \text{ч}^{-1}$), чем в малом и среднем озерах, соответственно. Это связано с более высокой концентрацией O_2 в донных отложениях больших термокарстовых озер из-за более интенсивного ветрового перемешивания. Высокая доступность O_2 в отложениях термокарстовых озер ускоряет разложение органического вещества в весенне-летний период из-за небольшой глубины озера и ветрового перемешивания. Это приводит к развитию активных метанотрофных сообществ, которые влияют на метанотрофию верхних слоев, богатых органикой донных отложений.

Проведение радиоуглеродного датирования ключевых термокарстовых озер не выявило каких-либо инверсий в сложении толщи донных отложений. Образцы из спорадической/прерывистой зоны мерзлоты и из зоны сплошной мерзлоты не имеют резких переходов в возрасте верхних и нижних слоев и имеют приблизительно один

возраст формирования донных отложений, что может указывать на более позднее формирование озерных комплексов в северных районах криолитозоны, чем в зоне изолированной мерзлоты. При этом вероятно, толща донных отложений представляет собой смесь более древнего органического углерода из окружающих озера мерзлых торфяников и относительно свежего органического материала.

При обработке имеющихся материалов включающей синтез большого набора данных, полученных в результате выполнения проекта, а также ранее полученных коллективом исполнителей научных результатов были выделены три основных категории доминирующих процессов, влияющих на долгосрочный баланс органического углерода термокарстовых озер: 1) аллохтонные поступления, 2) автохтонные поступления и 3) хранение и экспорт углерода. В качестве первого шага для построения в дальнейшем модели биогеохимических процессов в экосистемах термокарстовых озер нами была выполнена модель-схема потоков вещества в типичном «идеальном» термокарстовом озере. Данная схема в дополнении с анализом имеющихся у коллектива исполнителей и полученных в ходе работ по проекту результатов о ключевых звеньях биогеохимических процессов, позволит в дальнейшем в значительной степени преодолеть существующие неопределенности в балансовых оценках углерода и сопряженных с ним химических элементов.

Возможность практического использования результатов проекта:

Результаты проведенного исследования будут полезны для полноценного моделирования биогеохимических процессов в озерных экосистемах северных территорий, уточнения существующих и построения новых моделей процессов формирования элементного состава поверхностных вод Арктической зоны. Понимание и прогнозирование данных процессов имеет важное фундаментальное и прикладное значение. Полученные данные могут быть использованы для уточнения геохимических циклов элементов и механизмов их накопления в водах, обогащенных растворенным органическим веществом. Результаты, полученные при изучении термокарстовых озер, могут быть использованы как базовые составляющие биогеохимического фона, при изучении изменений химического состава компонентов экосистем севера Западной Сибири, происходящих при увеличении антропогенной нагрузки и климатических изменений. Кроме того, результаты могут быть использованы для разработки мероприятий по улучшению качества поверхностных вод при проведении мониторинговых исследований; в инженерно-геологических изысканиях, а также при составлении геокриологического прогноза ландшафтов районов нефтегазопромысловых работ Крайнего Севера.