

Сведения о выполненных работах  
в период с 01.07.2020 г. по 30.06.2021 г.

по проекту **«Экспериментальное моделирование механизмов формирования элементного состава воды термокарстовых озер Западной Сибири: роль растительного компонента»**,  
поддержанному Российским научным фондом

Соглашение № 19-77-00073

Руководитель: канд. биол. наук Манасыпов Ринат Мратович

В 2020–2021 годах, на втором этапе выполнения работ по проекту, проведен лабораторный эксперимент по выщелачиванию различных органов (корни, корневища, листья) растений-макрофитов (вахта трехлистная и осока водяная), проведены аналитические исследования проб, полученных в ходе эксперимента на анализ элементного состава (РОУ, макро- и микроэлементов) и растворенных CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>, изучен элементный состав растительного материала до начала и в конце эксперимента. Проведена оценка поступления химических элементов при выщелачивании макрофитов-доминантов термокарстовых озер. При разделении истинно-растворенной (<3 кДа) и коллоидной (0,45 мкм) фракций в образцах, описаны концентрации РОУ и химических элементов. На основании изучения спектрофотометрических характеристик образцов, проведено описание процессов, обуславливающих трансформацию РОВ низкомолекулярной и коллоидной фракций. Всего в результате работ получено и проанализировано более 120 образцов воды на анализ РОУ, РНУ и элементного состава, более 70 проб для определения концентрации растворенных парниковых газов (CO<sub>2</sub> и CH<sub>4</sub>).

Результаты лабораторного эксперимента показали, что значения электропроводности были максимальны в микрокосмах с листьями вахты и осоки, что может быть объяснено наиболее стремительным выщелачиванием основных элементов из растительного материала. Электропроводность в микрокосмах с корнями растений также имеет устойчивый тренд к увеличению в течение эксперимента. Значение рН уменьшалось для микрокосмов с вахтой (корни и листья) примерно на 0,5 единиц (с 6,4 до 6 ± 0,2). В микрокосмах с осокой (листья и корни) показатель рН снижался за первые 50 часов с 6,7 до 6,1, затем наблюдалось постепенное увеличение показателя и по истечении 4 суток в воде фиксировались стабильные околонеутральные значения.

При проведении эксперимента выявлена положительная динамика образования растворенного CO<sub>2</sub>. Наиболее активно образование CO<sub>2</sub> происходило в микрокосмах с листьями вахты и менее активно с листьями осоки, что может объясняться наиболее активной гетеротрофной деградацией растительного материала фотосинтезирующих органов, чем корней ( $p < 0,05$ ). При этом не наблюдалось статистически значимого тренда изменения концентрации растворенного метана в ходе эксперимента. Для всех изученных растительных субстратов наблюдалось стремительное увеличение концентрации РНУ в ходе эксперимента. Также для всех субстратов отмечена

статистически значимая корреляция между концентрацией  $\text{CO}_2$ , РНУ и электропроводностью ( $p < 0,01$ ). Концентрации РНУ по истечению 220 часов эксперимента достигали значений  $35 \pm 2$  мг/л. Во время выщелачивания листьев и корней вахты в воду поступало значительно большее количество РОУ, чем при выщелачивании растительного материала осоки. В первые часы эксперимента концентрация РОУ достигала  $215 \pm 15$  мг/л и  $172 \pm 9,6$  мг/л в микрокосмах с листьями и корнями вахты, соответственно. При этом в микрокосмах с осокой происходило уменьшение концентрации от  $112 \pm 15$  и  $110 \pm 16$  до  $67 \pm 8$  и  $72 \pm 15$  мг/л для листьев и корней, соответственно.

Основываясь на результатах проведенных исследований элементного состава воды можно выделить две основные группы элементов, в зависимости от их высвобождения из растительного материала: 1. Группа химических элементов проявляющая статистически значимое увеличение концентраций от времени экспозиции ( $p < 0,05$ ): K/Rb, Si, Mn, Cd, Ni, Zn, Ba, Fe и Al; 2. Группа химических элементов, не проявляющая статистически значимых зависимостей концентраций от времени эксперимента: Ca, Mg, Cu, As, Sr, U и РЗЭ. Значительное обогащение воды K/Rb, Si, Mn и Cd при добавлении растительного материала сохранялось на протяжении всей продолжительности экспериментов. Следовательно, эти элементы могут служить индикаторами выщелачивания высших растений при исследовании химического состава воды термокарстовых озер. На основании результатов, полученных в результате ультрацентрифугирования и разделения фракций РОУ, макро- и микроэлементов рассчитан процент коллоидной фракции изученных компонентов. Важным результатом данного раздела является обнаруженное сходство в процентах коллоидной фракции большинства химических элементов, между водами термокарстовых озер и водой в микрокосмах.

Проведение спектрофотометрических исследований позволило описать трансформацию органического вещества в ходе эксперимента. В начале эксперимента отмечено поступление в основном гидрофильного материала, на что указывает низкий уровень SUVA<sub>254</sub>. В первые часы эксперимента в воде наблюдалось небольшое количество ароматических углеводов, затем происходило стремительное увеличения показателя, это особенно характерно для листьев вахты и менее заметно для листьев осоки. При дальнейшей минерализации ароматического материала, количество гидрофобных веществ уменьшалось, и через 100 часов этот показатель приближался к исходным значениям для всех микрокосмов, что указывает на преобладание органических соединений с низкой молекулярной массой. Динамика коэффициента E<sub>2</sub>:E<sub>3</sub> согласуется с показателем SUVA<sub>254</sub> и подтверждает динамику содержания низкомолекулярных органических веществ таких как карбоновые кислоты в начале эксперимента и затем увеличение высокомолекулярных органических веществ предположительно ароматической структуры. Значения коэффициента E<sub>4</sub>:E<sub>6</sub> указывают на высокую степень конденсации ароматических групп РОВ или гумификации. Значения коэффициента E<sub>2</sub>:E<sub>4</sub> находились в диапазоне от 48 до 9. В первые часы эксперимента органическое вещество характеризовалось преобладанием автохтонных веществ, образовавшихся в результате

жизнедеятельности микроорганизмов, затем значения коэффициента резко снижались и далее оставались на близком уровне для всех микрокосмов до завершения эксперимента. Это предполагает включение в ОБ аллохтонных веществ, образовавшихся из продуктов неполной деградации остатков растений.

В ходе проведения эксперимента содержание элементов в растительных образцах изменялось, на основании чего можно говорить об активном выщелачивании в первую очередь Si, K и Rb для всех микрокосмов. Таким образом, при разрушении листьев вахты в воду наиболее активно поступал калий и его изоморфа Rb. Важно отметить, что наибольшее количество макро- и микроэлементов перешло в воду при выщелачивании листьев и корней вахты, что может быть объяснено наиболее активными процессами деструкции данного вида. Листья и корни вахты при выщелачивании, обуславливают в первую очередь сильное обогащение воды щелочными и щелочноземельными элементами (Li, Na, Mg, K), а также Si, Fe, Ni, Mn и Al. Листья и корни осоки являются менее активными источниками химических элементов, они в первую очередь ответственны за выщелачивание Na, K, Si, Mn, Al, а также трех- и четырехвалентных гидролизатов. Возможным объяснением данных различий может служить различия в стратегии накопления и перераспределения химических элементов в растениях. Полученные данные позволяют в первом приближении описать поступление элементов в воду термокарстовых озер в летний период при деструкции растительной массы высших растений-макрофитов. Макрофиты данной территории (ключевого участка «Ханымей»), доминантами которых являются изученные виды, по данным натурных наблюдений, а также наблюдений с БПЛА занимают от 1 до 5 % водной поверхности термокарстовых озер. При этом в пересчете на сухое вещество мы можем говорить о незначительном влиянии высшей водной растительности на формирование элементного состава воды термокарстовых озер данной территории, доминирующим источником углерода и растворенных элементов в которых являются мерзлый торф и деструкция затопленных мха и лишайника. Но при этом нужно отметить, что сохраняется важнейшая фитоиндикационная функция растений-макрофитов при изменении окружающей среды, ранее описанная в литературе (Manasyrov et al., 2021).