

УДК 556.565:556.561

## О ПРИМЕНИМОСТИ ОКИСЛИТЕЛЬНО-ВОССТАНОВИТЕЛЬНОГО ПОТЕНЦИАЛА ДЛЯ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ТОРФЯНЫХ ЗАЛЕЖЕЙ БОЛОТНЫХ ЭКОСИСТЕМ

Зубов И.Н., Орлов А.С., Селянина С.Б.

ФГБУН «Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаврова» Российской академии наук, Архангельск, e-mail: gumin@fciarctic.ru

В данной работе проведена оценка применимости и информативности окислительно-восстановительного потенциала и других физико-химических показателей торфяной залежи, как параметров для экспресс-оценки состояния торфяно-болотных экосистем на примере верховых болот европейского севера России. В статье представлены данные по изменению физико-химических показателей: окислительно-восстановительного потенциала (ОВП), общей минерализации и активной кислотности (рН) компонентов торфяной залежи (торфа и болотной воды) по глубине залегания. Для проведения исследований использовали ненарушенные участки верховых болот мохового типа, расположенные на территории Приморского и Мезенского районов Архангельской области. На основе экспериментальных данных о динамике изменения показателя ОВП по глубине залежи для исследуемых болотных массивов выделен ряд зон принципиально различающихся по условиям функционирования: верхний слой залежи – акротелм или условно деятельный слой, ограниченный уровнем колебания грунтовых вод и катотелм, который предложено разделить на зону промерзания, консервации и придонный слой. Для акротелма зафиксированы слабоокислительные (400–500 мВ) или слабовосстановительные (300–400 мВ) условия, что в первую очередь обусловлено его полной аэрацией и выражается в максимальных значениях ОВП и минимуме рН. Для более глубоких слоев залежи наблюдается постепенное изменение условий на интенсивно восстановительные (200 мВ и менее), что, по видимому, обусловлено низкой степенью аэрации и определяет ход биodeградации органического вещества торфа и богатство микробиоты, участвующей в разложении растительных остатков. Показано, что ОВП может служить комплексным показателем происходящих в торфяной залежи процессов.

**Ключевые слова:** торфяная залежь, физико-химические показатели, окислительно-восстановительный потенциал, активная кислотность, общая минерализация, верховые болота

## ABOUT THE APPLICABILITY OF REDUCTION-OXIDATION (REDOX) POTENTIAL FOR THE EVALUATION OF THE CONDITION OF THE PEAT DEPOSITS OF BOG ECOSYSTEMS

Zubov I.N., Orlov A.S., Selyanina S.B.

N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Arkhangelsk, e-mail: gumin@fciarctic.ru

The applicability and informative value of the redox potential and other physico-chemical properties of the peat deposit as parameters for the express-assessment of the state of peat-bog ecosystems on the example of oligotrophic bogs of the European north of Russia were evaluated in this paper. The article presents data on changes in the physicochemical properties (redox potential, total mineralization and active acidity) of the components of the peat deposit (peat and peat water) by depth. The undisturbed areas of moss type oligotrophic bogs located in the Primorsky and Mezen districts of the Arkhangelsk region were used in present study. A number of zones with fundamentally different functioning conditions are identified for the studied bog massifs on the basis of the experimental data on the dynamics of change in the redox potential characteristics by deposit depth. These zones are: the top layer of the deposit – an acrotelm or conditionally active layer limited by the level of groundwater fluctuation and catotelm, which it is proposed to divide into a zone of freezing, preservation and a bottom layer. Slightly oxidative (400-500 mV) or weakly reducing (300-400 mV) conditions are determined for acrotelm, which is primarily due to its complete aeration and is expressed in maximum redox potential values and minimum pH values. For the deeper layers of the deposit, a gradual change in the conditions to intensively reducing (200 mV or less) is observed, which is apparently due to the low degree of aeration and determines the biodegradation of peat organic matter and the diversity of microbiota involved in the decomposition of plant residues. It was shown that the redox potential can serve as a complex indicator of the processes occurring in the peat deposit.

**Keywords:** peat deposit, physicochemical properties, redox potential, active acidity, total mineralization, oligotrophic bogs

Арктическая зона РФ характеризуется высокой заболоченностью территории [1], с преобладанием болот верхового типа. Болотные природные комплексы представляют собой сложные саморегулирующиеся и постоянно развивающиеся системы, основные компоненты которых (характерные флора и фауна, микробиота, водная среда, торфяные отложения и т.д.) тесно взаимосвязаны, при этом изменение любого из них

приводит к существенной трансформации всей системы и даже к смене биоценоза.

Современные тенденции природопользования обуславливают актуальность поиска экспрессных методов оценки состояния болотных экосистем, в особенности Арктической зоны, ввиду изменения их естественного состояния, как за счет глобальных климатических процессов, так и в ходе активного освоения этих тер-

риторий, сопряженного с развитием хозяйственно-промышленной деятельности человека.

В настоящее время для оценки состояния болотных экосистем наиболее широко привлекаются биологические методы, в которых одним из основных источников информации служит растительный покров [2]. Его трансформация указывает преимущественно на изменения верхнего аэрированного слоя (называемого также деятельным или торфогенным), но при этом отклик системы на воздействие проявляется через достаточно продолжительный период и не дает достоверной информации о процессах, протекающих в нижних слоях залежи.

Представляется, что для описания состояния торфяной залежи по всей ее глубине более показательны физические, химические и физико-химические параметры, однако определение большинства из них весьма трудоемко и требует проведения продолжительной камеральной обработки. В силу активного развития приборостроения, появления портативного оборудования и практически полного отсутствия необходимости пробоподготовки (например, потенциометрические и кондуктометрические измерения) находят применение и в полевых условиях, что позволяет оценивать параметры системы экспрессно, в условиях наиболее приближенных к реальным и исключить влияние транспортировки и хранения проб [3].

Исходя из процессов, происходящих в торфяной залежи, показательной характеристикой представляется окислительно-восстановительный потенциал (ОВП) залежи. ОВП – интегральный показатель, отражающий совокупность факторов, отвечающих за формирование окислительно-восстановительного режима (содержание кислорода в залежи, состояние почвенных химических окислительно-восстановительных систем и биохимических окислительных и восстановительных процессов). Изменение численных значений данного показателя может служить источником информации об экологическом состоянии торфяной залежи и ее отдельных горизонтов, а также о ходе процесса торфообразования, включая трансформацию органического вещества и функционирование биологических сообществ. ОВП в значительной мере зависит от pH и минерализации – диагностических параметров, которые используются,

в частности, для градации болот по типу питания [4]. Информацию об ОВП можно получить непосредственно в природной обстановке путем прямых измерений, что делает привлекательным показатель ОВП для экспресс-оценки состояния торфяных залежей болотных экосистем.

Цель исследования: оценка применимости и информативности окислительно-восстановительного потенциала как параметра для экспресс-оценки состояния торфяно-болотных экосистем на примере верховых болот европейского севера России.

#### Материалы и методы исследования

В качестве тестовых площадок использовали участки ненарушенных верховых болот, расположенных на территории Приморского (площадка 1 – 64°19'43" N, 40°36'45" E; площадка 2 – 65°41'44" N, 40°12'4" E) и Мезенского (площадка 3 – 65°52'8"N, 44°14'44"E) районов Архангельской области, залежи которых в местах отбора проб сложены верховым сфагновым торфом на всю глубину разреза.

Площадка 1 расположена на территории Иласского болотного массива в районе болотной станции Брусовица. Общий рельеф – равнинный. Микрорельеф в зоне выбранной модельной площадки – грядово-мочажинный (50–60% площади занимают гряды высотой до 35 см). Положение разреза – на границе гряды и мочажины. В растительном покрове доминируют сфагнумы, встречаются кустарнички (клюква, вереск, багульник), пушица, росянка, карликовые березы и редкие угнетенные сосны высотой 2,5–3 м. Уровень грунтовых вод в период пробоотбора – 25 см. Подстилающие породы – суглинки. Мощность торфяной залежи в месте отбора проб 3,5 м.

Площадка 2 расположена вблизи устья р. Зимняя Золотица. Общий рельеф – равнинный. Микрорельеф – грядово-мочажинный, гряды высотой до 30 см. Положение разреза – мочажина в центральной части массива. Растительный покров представлен преимущественно сфагновыми мхами, встречаются кустарнички (морозка, водяника, голубика), осока, древесный ярус полностью отсутствует. Грунтовые воды выходят к поверхности. Подстилающая порода – глина. Мощность торфяной залежи в месте отбора 1,7 м.

Площадка 3 расположена вблизи г. Мезень. Общий рельеф – равнинный (Зона притундровых лесов). Микрорельеф – грядово-мочажинный, гряды высотой до 10 см.

Положение разреза – мочажина. Растительный покров представлен преимущественно сфагновыми мхами, встречаются кустарнички (морозка, водяника, вереск), пушица, осока, древесный ярус полностью отсутствует. Грунтовые воды выходят к поверхности. Материнская и подстилаящая порода – суглинки. Мощность торфяной залежи в месте отбора 2,5 м.

Отбор образцов торфа осуществлялся по визуально отличимым горизонтам залежи с помощью торфяного бура ТБ-5 [5].

Степень разложения исследуемых образцов торфа определялась микроскопическим методом. Ее значение варьируется в диапазоне 0...30% и возрастает с глубиной залегания.

Определение ОВП и pH проводилось непосредственно во время отбора проб торфа методом прямой потенциометрии [6; 7] на универсальном анализаторе жидкостей АНИОН 4100 (Инфраспек-Аналит, Россия) с применением электродной пары из хлоридсеребряного электрода ЭВЛ-1МЗ.1 и платинового промышленно-лабораторного электрода ЭВП-1СР для измерения ОВП в жидких и гетерогенных средах, и комбинированного электрода ЭСК-10603 для измерения pH. Определение ОВП и pH проводили параллельно в торфе и торфяной воде, отжатой из торфа соответствующего горизонта. Определение общей минерализации болотных вод проводили кондуктометрическим методом с помощью датчика ДКВ-1.

#### **Результаты исследования и их обсуждение**

Согласно полученным экспериментальным данным (рисунок) для исследуемых болот характерен контрастный окислительно-восстановительный режим, что согласуется с работами [7–9]. Анализ динамики изменения показателя ОВП по глубине залежи позволяет выделить ряд зон принципиально различающихся по условиям функционирования залежи.

Первая зона (0–40 см) представляет собой условно деятельный слой торфяной залежи (акротелм), и ограничена уровнем колебания грунтовых вод. Для акротелма исследуемых болотных массивов характерны слабоокислительные (400–500 мВ) или слабовосстановительные (300–400 мВ) условия, что обусловлено в первую очередь его полной аэрацией и выражается в максимальных значениях ОВП и минимуме pH торфяной залежи (рисунок, г, д). Для вод

акротелма значения ОВП всех исследуемых образцов несколько ниже, разница составляет 20–25 мВ. Значения активной кислотности, напротив, выше на 0,2–0,3 единицы pH. Минерализация вод условно деятельного слоя составила 27–35 мг/л. Стоит отметить, что в целом уровень определяемых показателей характерен для болот верхового типа [4].

Дальнейшее изменение физико-химических показателей в первую очередь обусловлено изменением уровня аэрации слоев и, как следствие, механизмов трансформации растительных остатков при переходе в не аэрируемую зону (катотелм). Данный переход в зону, расположенную ниже 40 см, сопровождается сменой слабоокислительных условий (500–400 мВ) на умеренновосстановительные (300–200 мВ).

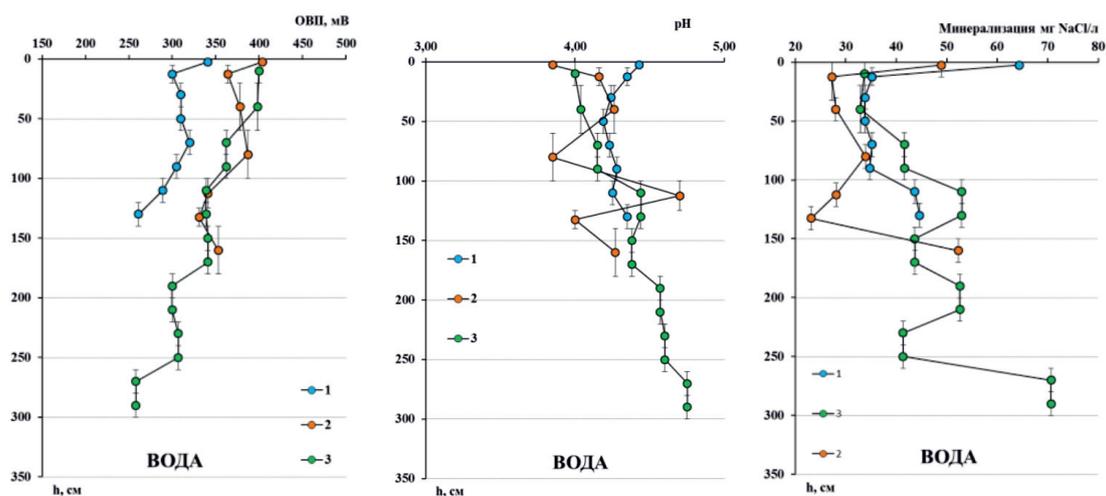
В катотелме в свою очередь можно выделить еще 3 зоны: зону промерзания, зону консервации и придонную зону. Мощность зоны промерзания определяется климатическими условиями региона и для исследуемых болотных массивов достигает 70–80 см. При этом верхняя часть зоны промерзания (40 см) приходится на акротелм.

Величина показателя ОВП в зоне промерзания катотелма не претерпевает изменений или, напротив, растет. Рост показателя ОВП в данном горизонте характерен для болот арктической зоны и вероятно обусловлен значительной продолжительностью его нахождения при отрицательных значениях температур.

Зона консервации, как правило, составляет основу торфяной залежи и напрямую зависит от ее мощности. Она ограничена сверху – зоной промерзания и снизу – придонным слоем. В целом для зоны консервации характерна минимальная зависимость от внешних факторов (климатических условий, поступления минеральных компонентов), что приводит к постепенному снижению показателя ОВП до 250 мВ и ниже. Отдельно взятые минимумы показателя ОВП, как правило, обусловлены более ранними воздействиями на данный торфяной горизонт. Наиболее явными причинами этого могут выступать пожары и поступлением поллютантов в результате трансграничного переноса и других воздействий техногенного характера на исследуемой территории. В целом зона консервации характеризуется изменением условий залежи со слабовосстановительных (350 мВ) на уме-

ренно-восстановительные (250 мВ). В таких условиях одним из ключевых факторов происходящих изменений является минеральный состав залежи, определяющий богатство и численность микробиоты, участвующей в разложении растительных остатков, а также функционирование Red-Ox систем, обусловленных наличием металлов с переменными валентностями. Считается, что для верховых болот биогеохимические циклы массообмена определяются атмосферной миграцией

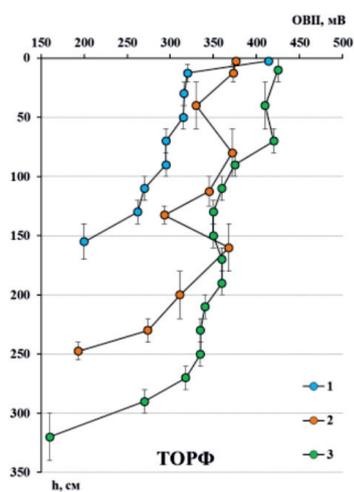
поток химических элементов. По этой причине залежи верхового типа являются геохимически автономными ландшафтами, поэтому содержание элементов в них подчинено в основном климатическим факторам [10]. При этом поступление минеральных компонентов из атмосферы в количестве, не превышающем буферную способность вышележащих слоев торфяной залежи, по-видимому, не оказывает воздействия на минерализацию зоны консервации.



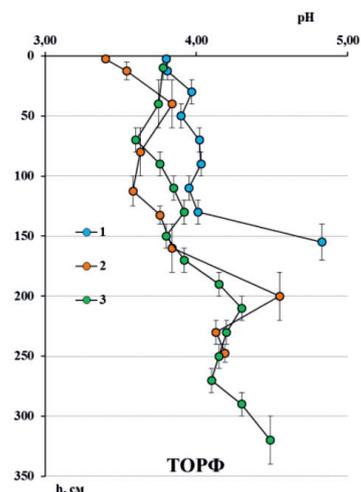
а)

б)

в)



г)



д)

*Изменение физико-химических показателей торфяной залежи по глубине:*

*а – ОВП грунтовых вод; б – активная кислотность грунтовых вод;*

*в – общая минерализация грунтовых вод; г – ОВП торфа, д – активная кислотность торфа*

Еще одним источником поступления минеральных веществ в тело залежи является их миграция от минерального дна. Это обуславливает наличие особого придонного слоя катотелма, ограниченного зоной распространения процессов миграции и подвижностью литогенных компонентов. Однако следует отметить, что для залежей верхового типа данная зона выражена гораздо слабее, чем для низинного [10], и требует в дальнейшем более глубокого изучения. Активная кислотность в данном слое находится в интервале 4,5–5,0 единиц рН, а показатель ОВП может достигать значений менее 200 мВ, что соответствует интенсивно восстановительным условиям.

Для грунтовых и поверхностных вод (рисунков, а, б) исследуемых болотных массивов наблюдается схожая динамика изменения показателей ОВП и активной кислотности.

### Заключение

Таким образом, особенности функционирования торфяной залежи во многом определяются комплексом абиотических факторов, среди которых особое значение имеют климатические, геохимические и гидрологические условия. Эти факторы не только определяют стадию существования болотной экосистемы, но и качественный состав ее отдельных компонентов, а также их характеристики. При этом ОВП может служить комплексным показателем происходящих в торфяной залежи процессов. Учитывая это, данный показатель должен быть связан с качественными изменениями основного компонента залежи – торфа.

*Исследование выполнено при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках темы № АААА-А18-118012390224-1 и проектов РФФИ № 17-45-290682 и № 18-05-60151.*

### Список литературы / References

1. Минаева Т.Ю., Сирин А.А. Биологическое разнообразие болот и изменение климата // Успехи современной биологии. 2011. Т. 131. № 4. С. 393–406.  
 Minayeva T.Yu., Sirin A.A. Peatland Biodiversity and Climate Change // Biology Bulletin Reviews. 2012. Vol. 2. № 2. P. 164–175. DOI: 10.1134/S207908641202003X.  
 2. Юрковская Т.К. Болота Архангельской области: ботанико-географические особенности и динамическое состояние // Материалы конференции «IX Галкинские чтения» (Санкт-Петербург, 5–7 февраля 2018 г.) / Под ред. Т.К. Юрковской. СПб.: Издательство СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2018. С. 243–246.

Yurkovskaya T.K. Peatlands Arkhangelsk region: phyto-geographical characteristics and dynamic status // Materialy konferentsii «IX Galkinskiye chteniya» (Sankt-Peterburg, 5–7 fevralya 2018 g.) / Pod red. T.K. Yurkovskoy. Sankt-Peterburg: Izdatel'stvo SPbGETU «LETI», 2018. P. 243–246 (in Russian).

3. Орлов А.С., Zubov И.Н., Селянина С.Б., Забелина С.А. Окислительно-восстановительный режим торфяной залежи верховых сфагновых болот Архангельской области // В сборнике: Болота и биосфера: материалы Всероссийской с международным участием X школы молодых ученых (Тверь, 17–21 сентября 2018 г.). Тверь, 2018. С. 221–226.

Orlov A.S., Zubov I.N., Selyanina S.B., Zabelina S.A. Reductive-oxidative behavior of sphagnum high-moor bog peat deposit in Arkhangelsk region // In the collection: Swamps and biosphere. Materials All-Russian with international participation X School of Young Scientists (Tver, 17–21 sentyabrya 2018 g.) Tver, 2018. P. 221–226 (in Russian).

4. Шишов Л.Л., Тонконогов В.Д., Лебедева И.И., Герасимова М.И. Классификация и диагностика почв России. Смоленск: Ойкумена, 2004. 342 с.

Shishov L.L., Tonkonogov V.D., Lebedeva I.I., Gerasimova M.I. Classification and detection of soils in Russia. Smolensk: Oykumena, 2004. 342 p. (in Russian).

5. Селянина С.Б., Труфанова М.В., Ярыгина О.Н., Орлов А.С., Пономарева Т.И., Титова К.В., Zubov И.Н. Особенности биотрансформации органических веществ в условиях болотных экосистем Севера (на примере Илаского болотного массива) // Труды Института биологии внутренних вод РАН. 2017. № 79 (82). С. 200–206. DOI: 10.24411/0320-3557-2017-10040.

Selyanina S.B., Trufanova M.V., Yarygina O.N., Orlov A.S., Ponomareva T.I., Titova K.V., Zubov I.N. Peculiarities of the biotransformation of organic matter under the conditions of Northern mire ecosystems (by the example of Ilasskoe mire massif, Russia) // Trudy Instituta biologii vnutrennikh vod RAN. 2017. № 79 (82). P. 200–206 (in Russian).

6. Лиштван И.И., Базин Е.Т., Гамаюнов Н.И., Терентьев А.А. Физика и химия торфа. М.: Недра, 1989. 304 с.

Lishtvan I.I., Bazin Ye.T., Gamaayunov N.I., Terentyev A.A. Peat Physics and Chemistry. M.: Nedra, 1989. 304 p. (in Russian).

7. Орлов Д.С., Садовникова Л.К., Суханова Н.И. Химия почв. М.: Высш. шк., 2005. 558 с.

Orlov D.S., Sadovnikova L.K., Sukhanova N.I. Soil chemistry. M.: Vyssh. shk., 2005. 558 p. (in Russian).

8. Wright E.L., Black C.R., Cheesman A.W., Drage T., Large D., Turner B.L., Sjögersten S. Contribution of subsurface peat to CO<sub>2</sub> and CH<sub>4</sub> fluxes in a neotropical peatland // Global Change Biology. 2011. Vol. 17. P. 2867–2881. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2011.02448.x.

9. Инишева Л.И., Шайдак Л.В., Сергеева М.А. Динамика биохимических процессов и окислительно-восстановительное состояние в геохимически сопряженных ландшафтах олиготрофного болота // Почвоведение. 2016. № 4. С. 505–513. DOI: 10.7868/S0032180X16040055.

Inisheva L.I., Shaydak L.V., Sergeeva M.A. Dynamics of biochemical processes and redox conditions in geochemically linked landscapes of oligotrophic bogs // Eurasian Soil Science. 2016. Vol. 49. № 4. P. 466–474. DOI: 10.1134/S1064229316040050.

10. Ларина Г.В., Инишева Л.И., Порохина Е.В. Содержание химических элементов в болотных экосистемах Северного Алтая // Известия Иркутского государственного университета. Серия: Науки о Земле. 2017. Т. 21. С. 80–95.

Larina G.V., Inisheva L.I., Porokhina Ye.V. The Contents of Chemical Elements in Mire Ecosystems of the North Altai // Izvestiya Irkutskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Nauki o Zemble. 2017. Vol. 21. P. 80–95 (in Russian).