



Издатель

ФГБОУ ВО «Петрозаводский государственный университет»
Российская Федерация, г. Петрозаводск, пр. Ленина, 33

Научный электронный журнал

ПРИНЦИПЫ ЭКОЛОГИИ

<https://ecopri.ru>

№ 3 (37). Сентябрь, 2020

Главный редактор

А. В. Коросов

Редакционный совет

В. Н. Большаков
А. В. Воронин
Э. В. Ивантер
Н. Н. Немова
Г. С. Розенберг
А. Ф. Титов
Г. С. Антипина
В. В. Вапиров
А. М. Макаров

**Редакционная
коллегия**

Т. О. Волкова
Е. П. Иешко
В. А. Илюха
Н. М. Калинкина
J. P. Kurhinen
А. Ю. Мейгал
J. B. Jakovlev
B. Krasnov
A. Gugolek
В. К. Шитиков
В. Н. Якимов

Службы поддержки

А. Г. Марахтанов
Е. В. Голубев
С. Л. Смирнова
Н. Д. Чернышева
М. Л. Киреева

ISSN 2304-6465

Адрес редакции

185910, Республика Карелия, г. Петрозаводск, ул. Ленина, 33.

E-mail: ecopri@petsu.ru

<https://ecopri.ru>





УДК 551.312.22(470.331)

ОРГАНИЗАЦИЯ И ДИНАМИКА ОРГАНОГЕННОГО РЕЛЬЕФА ВЕРХОВОГО БОЛОТА

ПУЗАЧЕНКО
Михаил Юрьевич

*к. г. н., Институт географии РАН (119017, Москва,
Старомонетный переулок, дом 29, стр. 4.),
m.yu.puzachenko@igras.ru*

ШИРОНАЯ
Иван Иванович

*Институт проблем экологии и эволюции РАН (119071,
Москва, Ленинский проспект, д. 33),
ivan.shironya@gmail.com*

Ключевые

слова: верховое болото, трансект, рельеф, уровень болотных вод, прирост мха

Получена:

05 июля 2020 года

Подписана к печати:

06 октября 2020 года

Аннотация. Работа посвящена исследованию организации структуры и динамики рельефа верхового болотного массива на основе многократных измерений на трансекте с регулярным шагом 5 м и длиной 575 м. Трансект субшироотно пересекает склон болотного массива с перепадом высот около 1 м от краевых частей к его центру. Многолетние измерения высот показали их значительное варьирование с амплитудой до 40 см. Для выявления возможных механизмов, определяющих варьирование высот, в течение 5 лет измерялись приросты мха и уровень болотных вод по точкам измерения высот рельефа. На основе измерений высот рельефа с помощью факторного анализа выделены его инвариантная и динамическая компоненты в пространстве-времени. Получено, что для средне-низкочастотных составляющих спектра инвариантной и динамической компонент высот рельефа размерность является топологической. Высокочастотная составляющая спектра инвариантной компоненты рельефа имеет размерность немного ниже топологической, а для динамической компоненты она немного выше бурого шума. По измерениям приростов мха и уровня болотных вод также выделены их инвариантные и динамические компоненты, размерность спектра которых для всех частот сходна и немного выше бурого шума. Совместный анализ измерений высот поверхности болота, приростов мха и уровня болотных вод показал, что инвариантная и динамическая компоненты рельефа практически полностью описываются от уровня болотных вод и приростов мха. При этом инвариантные и динамические компоненты приростов мха и уровня болотных вод определяются от остальных переменных только для больших и средних периодов их варьирования. Таким образом, выделяется два основных механизма организации рельефа поверхности болота, различающихся для его микро- и мезомакроформ. Для приростов мха и уровня болотных вод возможно наличие дополнительных механизмов организации и динамики для малых периодов их варьирования.

© Петрозаводский государственный университет

Введение

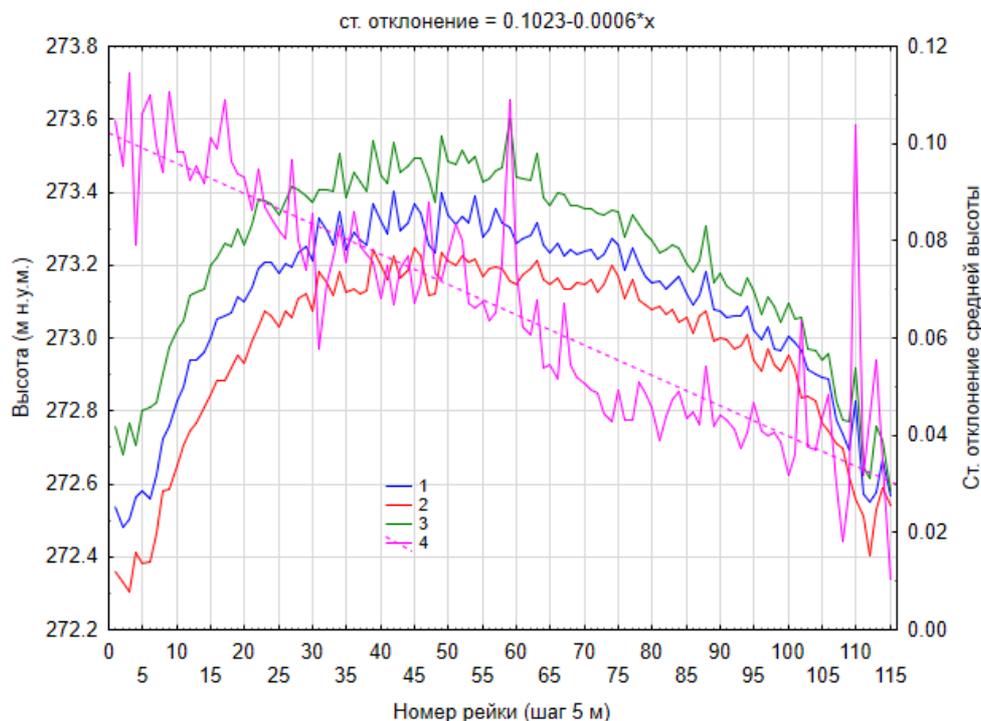
Работа посвящена исследованию организации органогенного рельефа верхового болота как динамической системы. Исследуется пространственно-временная структура рельефа поверхности болота и рассматриваются возможные факторы ее формирования и динамики. На основе трансекта с регулярным шагом в течение нескольких лет за вегетационный период измерены основные характеристики поверхности верхового болота, такие как координаты фиксированных точек, уровень болотных вод и прирост мха. Зафиксированы значительные колебания высоты поверхности болота, не описанные в литературе, в связи с чем высока актуальность и научная новизна полученных результатов.

Материалы

Исследование проводилось на субширотном трансекте с регулярным шагом, расположенном в средней части склона верхового болотного массива в системе болотных массивов «Старосельский мох». Массив находится в восточной части Центрально-Лесного государственного природного биосферного заповедника (Тверская область). Краевые части исследуемого массива заняты сосновым редколесьем, основная поверхность, пушицево-сфагновая, осложнена грядами с присутствием клюквы, кочками с долгомошниками и очередниково-сфагновыми западинами. В центральной части болота, в рамках трансекта, мощность торфа достигает 420–430 см при калиброванном возрасте около 10 тыс. лет (определение возраста проводилось в Институте географии РАН), на краях при 40–50 см – 20–140 лет. С востока трансект ограничен минеральным островом с елово-мелколиственным лесом, с запада – основной поверхностью водораздела под мелколиственно-еловым лесом. Измерение поверхности рельефа болота по трансекту с регулярным шагом началось с 2006 г., когда были проведены первые измерения высот участка верхового болота на трансекте с шагом 10 м и длиной 570 м. После засухи 2010 г., в 2011 г., было проведено повторное измерение высот поверхности с шагом в 5 м (115 точек). Получено, что высота поверхности выросла относительно 2006 г. в среднем на 14 см, что не могло быть обеспечено только приростами мха. При этом высота западного склона болота повысилась в среднем на 20 см, восточного – на 10 см. Дальнейшие измерения проводились один-два раза в год с шагом опробования 5 м по фиксированным точкам и 1 м по поверхности болота. В 2015 г. с помощью цифрового тахеометра были установлены снегомерные рейки с погрешностью позиционирования до 3 см на фиксированную глубину 30 см с шагом 5 м. Это позволило дополнительно, помимо измерений горизонтального и вертикального смещения оснований и вершин реек, измерять прирост мха и уровень болотных вод (УБВ). С середины 2017 г. измерение положения реек осуществляется роботизированным тахеометром с привязкой по двум реперным точкам и корректировкой по третьему независимому реперу. С конца 2015 г. проводятся полустационарные измерения координат оснований реек, прироста мха и УБВ в течение вегетационного периода. В результате получено 30 сроков измерений координат поверхности болота (более 10 тыс. измерений), из них 14 с шагом 1 м, 13 сроков измерений УБВ (1500 измерений) и 18 сроков измерений прироста мха (2000 измерений). Для исследования структуры наноформ рельефа поверхности болота были произведены измерения высот трех участков трансекта с различной степенью выраженности наноформ с шагом в 10 см и длиной 10 м.

Сравнение высот, измеренных в течение последних 10 лет, показывает среднюю амплитуду колебаний поверхности болота около 20 см (рисунок). Изменения уровня поверхности болота показывают различия в вертикальном движении его частей и достигают амплитуды 40 см в западной части трансекта, 20 см в центральной и менее 10 см в восточной части. Все эти движения происходят на фоне роста поверхности в связи с развитием акротельма. Расчет равновесного профиля куполообразного верхового болота, выполненный по модели, полученной К. Е. Ивановым при интегрировании одномерного уравнения Дарси, показал (среднемноголетний модуль

стока для болота принят 200 мм/год; проточность $q = 0.7-2$ л/сек; модуль проточности $M = 1.4-2.5$ см²/сек; $y_{\max} = 110.3$ см), что для центральной части болота четко наблюдается более плоский характер поверхности, т. е. поверхность болота пологовыпуклая (Сысуев, Пузаченко, 2019). Также значительно превышение наблюдаемой поверхности болота на западе трансекта от модельных значений.



Высоты поверхности болота по трансекту (нумерация реек с запада на восток). 1 - средняя, 2 - минимальная, 3 - максимальная, 4 - ст. отклонение средней высоты с линейной аппроксимацией

The height of the bog surface along the transect (numbering of rods from West to East). 1 - average, 2 - minimum, 3 - maximum, 4 - std. deviation of the mean height with linear approximation

Проведенные измерения прироста мха по рейкам трансекта показывают средний вертикальный прирост более чем на 2 см за год. Крайняя западная часть трансекта демонстрирует наибольший прирост мха - в среднем на 2.5 см за год. В центральной части болота прирост составляет чуть более 2 см за год. Крайняя восточная часть трансекта имеет наименьшие приросты мха - в среднем около 1.5 см за год. При этом для отдельных точек отмечаются приросты до 6.5 см за год, наряду с точками, где прирост составил от 0 до 0.5 см. Горизонтальный рост мха и, соответственно, рост площади болота отмечаются для его западного края со скоростью около 2 м в год. Для этой же области отмечается максимальный прирост вертикальной высоты мха, составивший в среднем 15 см за год.

Средний уровень болотных вод колеблется от 7 до 16 см при среднем многолетнем 10 см. Уровень болотных вод максимален в крайней западной части трансекта, где они выходят на поверхность, и минимален в его восточной части. Верхняя часть западного склона болота в среднем имеет большие глубины болотных вод (7-13 см), чем восточная (5-7 см). Также значительна локальная дифференциация УБВ в зависимости от форм рельефа поверхности болота: на кочках УБВ в среднем на 15-20 см ниже, чем в западинах.

Для определения структуры торфяных отложений произведено непосредственное исследование их профиля с помощью пробоотборника с закрывающейся крышкой для семи точек трансекта, а также измерена мощность торфа с шагом в 10 м. Было получено, что с глубины 60-70 см до 110-130 см между

акротельмом и катотельмом располагается сильно обводненный горизонт, практически лишенный органического материала. Дополнительно было проведено исследование профиля торфяных отложений георадаром ОКО-2, антенной 250 МГц с шагом по профилю 10 см и накоплением 16, которое показало, помимо основных элементов строения профиля торфяных отложений, наличие внутреннего слоя с резкими границами в верховом торфе с глубины 60–70 см и мощностью 45–60 см, который может быть связан с обводнением. Данный слой выклинивается на поверхность в крайней западной части трансекта в виде ручья, текущего по закрайке болота на юг. Для восточной части трансекта явного выхода этого горизонта к поверхности болота не наблюдается.

Таким образом, собран значительный объем данных по нескольким переменным, позволяющий провести их совместный статистический анализ и интерпретировать полученные результаты.

Методы

Накопленные к настоящему моменту данные позволяют провести статистический анализ организации и динамики поверхности верхового болота и определить ее связь с другими измеренными характеристиками. На первом этапе анализа каждая из характеристик обобщается методом главных компонент факторного анализа за все сроки измерений. В результате первая компонента содержит информацию об общем состоянии характеристики (инвариант) за все сроки наблюдений, а последующие – различия между сроками или сроки с аномальными значениями некоторых точек. Далее значимые факторы подвергаются спектральному анализу для оценки числа механизмов организации характеристик болота. Для этого использован показатель Хёрста, отражающий наклон спектра: чем больше наклон спектра, тем выше его значение и тем более взаимоорганизована анализируемая характеристика. Значимые различия показателя Хёрста для частей спектра могут указывать на различные механизмы формирования исследуемой характеристики для разных пространственных масштабов. Общность или различия показателя Хёрста для спектров разных характеристик могут показывать общность и различия в механизмах их организации и динамики. Для определения пространственной структуры исследуемых переменных их главные компоненты раскладываются на периодические составляющие с помощью вейвлет-анализа с последующей реконструкцией. На основе мультирегрессионного анализа определяются уровень и характер связи исследуемых характеристик. В результате такой подход дает возможность выделить как общую составляющую для всех сроков измерений, так и различия между ними, а также возможные факторы наблюдаемой организации и динамики поверхности болота.

Результаты

Факторный анализ методом главных компонент измерений высот поверхности болота с шагом в 1 м за все сроки наблюдений показал наличие одного преобладающего фактора, который описывает около 97 % варьирования высот поверхности по срокам измерений. Соответственно он максимально положительно связан со всеми сроками наблюдений и отражает инвариантное состояние высот рельефа. Второй фактор, описывающий около 2 % варьирования высот, положительно определяет сроки съемки с 2013 по начало мая 2015 г. и слабо отрицательно все остальные сроки измерений, кроме мая 2016 г., с которым связь существенна. Таким образом, второй фактор отражает динамические изменения высоты поверхности болота и выделяет западную часть трансекта положительными значениями, в то время как восточная часть находится в отрицательной области второго фактора. Учитывая факторные нагрузки, получаем, что с 2013 по начало 2015 г. западная часть трансекта была несколько выше инвариантного состояния болота, в то время как восточная – ниже. В мае 2016 г. наблюдалась обратная ситуация. Остальные сроки измерений близки к инварианту, отображаемому первым фактором.

Разложение выделенных факторов высот поверхности болота на частотные

составляющие проводится в программе AutoSignal на основе вейвлет-фильтрации и реконструкции значений фактора по непрерывным интервалам частот с наиболее выраженной плотностью значений, выражаемой в децибелах. В результате для первого фактора выделено шесть частотных интервалов с периодами менее 5 м, 5–14 м, 14–36 м, 36–125 м, 125–200 м, 200–385 м и тренд более 385 м. Наибольшая амплитуда значений приходится на периоды колебаний фактора от 125 м и выше. Тренд первого фактора рельефа отражает колоколообразный характер основной поверхности болота с максимумом высот в его центральной части и минимумом на краях. Наиболее низкочастотная составляющая первого фактора рельефа максимальными значениями выделяет средние части склонов болота. Минимальными значениями выделяются края болота, а также его центральная часть. Периоды первого фактора 125–200 м и 36–125 м выделяют максимальными значениями нижние части склонов болота, а минимальными – его края. Высокочастотная составляющая первого фактора с периодами от 36 до 2 м отражает локальное варьирование высот, амплитуда которых максимальна для средней части болота, а также для его краевых частей. Спектральный анализ показал небольшие различия в наклоне спектра на периодах от 2 до 36 м и в его остальной части. В результате для высоких (показатель Хёрста 0.94) и средних и низких (1.13) частот можно предположить несколько различающиеся механизмы формирования соответствующих структур рельефа болота.

Второй фактор рельефа, отражающий основные различия между сроками съемки, раскладывается на 7 периодов (менее 4 м, 4–6 м, 6–20 м, 20–59 м, 59–143 м, 143–250 м, 250–400 м) и тренд более 400 м. В отличие от первого фактора, амплитуды колебаний составляющих второго фактора практически одинаковы. Тренд выделяет наиболее высокие значения второго фактора высот рельефа для западной части трансекта и низкие для восточной. Низкочастотная составляющая с периодом 250–400 м максимальными значениями выделяет нижние части склонов болота при минимальных значениях на краях болота и в центральной части. Период 143–250 м высокими значениями выделяет центральную часть болота, а также западный край болота и нижнюю часть восточного склона. Период 59–143 м выделяет высокими значениями западный край болота, среднюю часть склонов болота и его центральную часть. Минимальные значения характерны для восточного края болота. Период 20–59 м максимальными значениями выделяет западный край болота и его центральную часть при минимальных значениях для восточного края болота и его центральной части. Высокочастотная составляющая второго фактора высот поверхности болота с периодами менее 20 м показывает высокую амплитуду в центральной части болота, на его западном склоне, а также для его краевых частей. Показатель Хёрста для высокочастотной части спектра (2–20 м) второго фактора рельефа составил 0.83, для средне- и низкочастотной 1.15. В результате для средних и низких частот факторных компонент рельефа можно предположить сходные механизмы формирования, в то время как для высокочастотных составляющих они могут различаться.

Исследование структуры рельефа на наиболее технически возможном высокочастотном уровне по трем участкам трансекта со слабо-, средне- и сильновыраженными наноформами рельефа длиной 10 м и шагом 10 см дает возможность оценить сходства и различия в организации рельефа на наиболее высокочастотном уровне с организацией рельефа всего болота. Первый участок расположен на восточном склоне болота и имеет средневыраженные наноформы рельефа с амплитудой около 17 см и std. отклонением 4 см. Анализ спектра показал, что он имеет единую размерность с показателем Хёрста 0.96, что близко к значению, полученному для высокочастотной составляющей первого фактора высот для всего трансекта. Второй участок расположен в центральной части болота с выраженными наноформами рельефа с амплитудой около 25 см и std. отклонением 7 см. Для всего спектра наклон однороден и показатель Хёрста составляет 1.06, что говорит об очень высокой детерминированности рельефа. Третий участок высокочастотной съемки рельефа расположен на западном склоне болота, имеет наименее выраженные

наноформы рельефа с амплитудой высот около 10 см и std. отклонением 2 см. Спектр для этого участка неоднороден, для высокочастотной области (до 1 м) показатель Хёрста составляет 1.06, что свидетельствует о высоком самоподобии рельефа на периодах до 1 м. Для средне- и низкочастотной составляющей спектра показатель Хёрста составляет 0.71, т. е. средний уровень самоподобия высот рельефа для периодов более 1 м. Таким образом, в отличие от первых двух участков, третий, с наименее выраженным нанорельефом, имеет мультифрактальный спектр, включающий высокочастотную составляющую с высоким самоподобием и средне-низкочастотную с более низким уровнем пространственных взаимосвязей.

В результате проведенного анализа высокочастотной структуры рельефа на трех участках с различным проявлением наноформ рельефа получено, что в целом она имеет однородную структуру с показателем Хёрста, близким к полученному для высокочастотной составляющей всего рельефа трансекта. При этом для участка с невыраженными наноформами рельефа показатель Хёрста меняется для высокочастотной и средне-низкочастотной составляющих. Наиболее выражены периоды от 1 до 5 м, а высокочастотная составляющая имеет малые амплитуды высот. Наряду с этим для каждого участка как выделяемые периоды, так и их выраженность несколько различаются. С учетом полученных данных предельным шагом съемки для всего трансекта можно принять значение 50 см, при том что съемка с шагом в 1 м охватывает основные выраженные периоды рельефа на самых высоких частотах. Шаг опробования в 5 м также достаточно полно охватывает основное варьирование наноформ рельефа, а с учетом его самоподобия до пределов возможности измерений позволяет использовать такой шаг для описания всего спектра частот рельефа.

Факторный анализ прироста высоты мха по рейкам за все сроки измерений показал наличие двух факторов, определяющих 82 % и 8 % варьирования прироста за все сроки измерений соответственно. Первый фактор определяется максимальными положительными нагрузками по всеми сроками измерений. Второй фактор положительно определяется поздними сроками измерений и отрицательно-ранними. Таким образом, первый фактор отражает средний прирост мха, накопленный за период измерений, а второй – различия между минимальными и максимальными высотами мха, соответствующими начальному и конечному периодам измерений.

Вейвлет-разложение первого фактора высоты мха позволяет выделить семь периодов с высокими плотностями значений и тренд более 385 м. Наибольшая амплитуда характерна для периода 20–50 м, при этом низкочастотные составляющие имеют наименьшие амплитуды колебаний. Тренд первого фактора выделяет положительными значениями восточную часть трансекта, а отрицательными – западную. Для периода 250–385 м характерны высокие значения для начала трансекта и его центральной части и низкие для склонов болота. Третий период 167–250 м высокими значениями выделяет западный край и средние части склонов болота. Низкими значениями выделяются восточный склон болота, его центральная часть и восточная окраина. Для периода 67–167 м характерны четыре выраженных максимума первого фактора в начале трансекта, в его центре и на восточном склоне болота и четыре минимума. Период 50–67 м имеет небольшие амплитуды колебаний, наиболее выраженные на краях трансекта. Характеризующийся максимальными амплитудами период 20–50 м наиболее выражен в начале трансекта, в его средней части и на восточном склоне болота. Высокочастотные составляющие от 20 до 10 м наиболее выражены для склонов болота. Показатель Хёрста является общим для всего спектра первого фактора высоты мха и составляет 0.83, что совпадает с показателем Хёрста для высокочастотной составляющей второго фактора рельефа. Таким образом, первый фактор высоты мха отражает незначительный положительный тренд в его росте для восточной части болота при максимальной выраженности средних и, особенно, высоких частот, характеризующих локальные условия роста мха, возможно, связанные с соответствующими частотами рельефа поверхности болота.

Для второго фактора высоты мха выделены 9 периодов и тренд более 385 м. Он выделяет максимальными значениями центральную часть болота, минимальными

западную часть трансекта и его восточный край. Период 250–385 м выделяет высокими значениями склоны болота, а минимальными – его центральную часть и края. Период 143–250 м высокими значениями выделяет склоны и центральную часть болота. Период 100–143 м имеет небольшую амплитуду с пятью максимумами. Периоды менее 100 м имеют большие амплитуды значений второго фактора высоты мха, выраженные на всем протяжении трансекта. Таким образом, можно отметить более быстрый рост мха в центральной части болота на фоне выраженных локальных колебаний его прироста. Показатель Хёрста для всего спектра второго фактора является общим и составляет 0.83, как и для первого фактора высоты мха. В результате можно с большой долей уверенности предположить единый механизм формирования приростов мха на всем частотном диапазоне измерений.

Факторный анализ измерений УБВ по рейкам трансекта показал наличие одного статистически значимого фактора, описывающего 65 % варьирования. Он имеет максимальные положительные связи со всеми рассматриваемыми сроками измерений. Таким образом, чем выше значения первого фактора, тем выше УБВ. Второй фактор, описывающий около 10 % варьирования, определяется сроками измерений с различающейся пространственной структурой УБВ при его среднем уровне около 10 см. Высокие значения фактора отражают низкий УБВ (более 10 см) для нижней части западного склона болота в середине октября 2017 и 2019 гг. и в конце ноября 2019 г.; низкие – высокий УБВ (менее 10 см) для того же участка болота для начала сентября 2016 г. и середины июля 2017 и 2019 гг. Особенно эти различия увеличиваются для положительных форм рельефа, где достигают 5 см. Остальные участки болота в эти сроки практически не различаются по УБВ. В результате, с учетом среднего УБВ за эти сроки измерений, можно определить, что второй фактор отражает противоположные тенденции УБВ для нижней части западного склона болота при среднем УБВ около 10 см.

Вейвлет-разложение и реконструкция первого фактора уровня болотных вод, измеренного по рейкам трансекта, показали наличие семи периодов и тренда более 385 м. Максимальные амплитуды характерны для высокочастотных составляющих с периодом менее 63 м. Тренд первого фактора выделяет более высокий УБВ для восточной части трансекта. Период 217–385 м выделяет высокий УБВ для нижней части восточного склона болота и верхней части западного склона. Для периода 111–217 м характерны высокие значения в начале трансекта, верхней части восточного склона болота, центральной части болота и средней части восточного склона. Период 63–111 м практически не выражен на восточном склоне болота при максимальных значениях для начала трансекта. Периоды менее 63 м имеют наибольшую амплитуду на краях болота, в верхней части восточного склона и прилегающей к нему центральной части, а также в верхней части западного склона болота. Таким образом, в среднем УБВ выше для восточной части болота при его высоком варьировании на малых периодах. Для периодов менее 63 м показатель Хёрста составил 0.83, для остальных – 0.87. Учитывая небольшие различия в наклоне спектра, можно предположить единый механизм формирования УБВ на всем спектре частот первого фактора УБВ с тем же показателем Хёрста, что были получены для высокочастотной составляющей второго фактора рельефа и факторов высоты мха.

Для второго фактора УБВ выделено шесть периодов и тренд более 416 м. Максимальные амплитуды колебаний второго фактора отмечаются для периода 63–143 м и менее 20 м. Тренд выделяет высокие значения второго фактора для западной части болота и низкие для восточной. Таким образом, при высоком среднем УБВ их уровень для западной части болота будет выше, а для восточной – ниже среднего уровня, и наоборот. Период 250–416 м высокими значениями выделяет средние части склонов болота, что определяет более высокий УБВ для этих позиций при их высоком среднем уровне. Для периода 143–250 м характерны максимальные значения для нижних участков склона болота и повышенные для его центральной части. Периоды 63–143 и 39–63 м максимальными значениями выделяют краевые части болота. Для периодов менее 39 м наибольшие амплитуды значений УБВ характерны для краевых

частей болота и его центральной части. В результате можно отметить, что при высоком и низком среднем УБВ для различных частей болота проявляются различные тенденции изменения УБВ. Большие амплитуды высокочастотных составляющих факторов УБВ, по сравнению с низкочастотными составляющими, отражают высокую изменчивость УБВ на фоне общих закономерностей их распределения, в определенной степени различающихся для высокого и низкого УБВ в целом. Показатель Хёрста для второго фактора УБВ однороден для всех периодов и составляет 0.81, что практически совпадает с его значениями, полученными для первого фактора УБВ, высокочастотной составляющей второго фактора рельефа и факторов высоты мха.

Таким образом, в результате вейвлет-разложения и реконструкции получены основные периоды, описывающие как инвариантные состояния рассматриваемых характеристик, так и их динамические составляющие. Оценка показателя Хёрста, факторных обобщений рассматриваемых характеристик показала возможность наличия общего механизма формирования высокочастотной составляющей динамической компоненты высот рельефа, приростов мха и УБВ. Для формирования инварианта высот болота можно предположить наличие двух основных механизмов, различающихся для высоких и средних-низких частот. Динамическая компонента высот поверхности болота также определяется двумя механизмами, различными для высокочастотной составляющей и для остальных частот. Таким образом, механизм, формирующий средне- и низкочастотные структуры рельефа для его инвариантной и динамической составляющих, является общим и отсутствует для других рассматриваемых характеристик. В результате можно выделить как минимум два независимых механизма (процесса), определяющих варьирование рассматриваемых характеристик в пространстве и времени: 1) механизм формирования средне-низкочастотных составляющих инварианта и динамической компоненты высот рельефа с показателем Хёрста 1.13–1.15, отражающим высокую степень связанности системы; 2) механизм формирования высокочастотной составляющей динамической компоненты рельефа, приростов мха и УБВ с показателем Хёрста 0.81–0.87, отражающим средний уровень связанности системы. Высокочастотная составляющая спектра частот первого фактора рельефа с показателем Хёрста 0.94, возможно, является результатом комбинированного воздействия обоих процессов.

Полученные вейвлет-реконструкции факторных обобщений рассматриваемых характеристик используются для установления возможных взаимосвязей между ними на основе мультирегрессионного анализа. Для их определения каждый фактор рассматриваемых характеристик аппроксимируется от периодов остальных характеристик. Первый фактор рельефа практически полностью (исправленный $R^2 = 0.97$) описывается от периодов факторов УБВ и приростов мха. Наибольший положительный вклад в описание дают тренд второго фактора УБВ, тренд и период 250–385 м второго фактора высоты мха. Таким образом, чем выше скорость прироста высоты мха, тем выше поверхность болота при низком УБВ для нижней части западного склона болота в периоды высокого среднего УБВ. Второй фактор рельефа также описывается на высоком уровне (исправленный $R^2 = 0.83$) от периодов факторов УБВ и высоты мха. Наибольшая связь – отрицательная с трендом первого фактора высоты мха. Таким образом, чем больше средний прирост высоты мха, тем ниже высота поверхности болота в период его высокого среднего уровня.

Первый фактор прироста высоты мха описывается от периодов факторов рельефа и УБВ на среднем уровне (исправленный $R^2 = 0.45$). Регрессионная модель хорошо отражает его низко- и среднечастотные составляющие. Наибольший вклад в модель с отрицательным знаком дают периоды от 2 до 36 м первого фактора рельефа. В результате средний прирост мха меньше при больших высотах микроформ рельефа. Второй фактор прироста мха также описывается на среднем уровне (исправленный $R^2 = 0.5$). В первую очередь модель описывает низко- и среднечастотные составляющие второго фактора высоты мха. Наибольший вклад в модель с отрицательным знаком дает наиболее высокочастотная составляющая первого фактора рельефа и его период 36–125 м. Как и для первого фактора высоты мха, при больших высотах рельефа для

нано- и мезоформ рельефа скорость прироста мха замедляется.

Первый фактор УБВ достаточно хорошо определяется от факторов рельефа и высоты мха (исправленный $R^2 = 0.76$). Наибольший вклад в модель с отрицательным знаком дают высокочастотные составляющие первого фактора рельефа, а также среднечастотная составляющая первого фактора высоты мха. Наибольший положительный вклад в модель дает среднечастотная составляющая второго фактора рельефа. Таким образом, чем выше микроформы рельефа и приросты мха для мезоформ рельефа, тем ниже УБВ. При больших значениях высот мезоформ рельефа для нижней части западного склона болота УБВ повышается. Второй фактор уровня болотных вод описывается от периодов факторов рельефа и мха несколько хуже, чем первый (исправленный $R^2 = 0.57$). В результате высокочастотная составляющая второго фактора уровня болот описана слабо. Наибольший положительный вклад в модель дают наиболее высокочастотная и среднечастотная составляющие первого фактора рельефа. Наибольший отрицательный – тренд первого фактора мха и среднечастотная составляющая второго фактора мха. Таким образом, чем выше высота нано- и мезоформ рельефа и ниже скорость прироста мха для мезоформ и в целом, тем ниже УБВ для нижней части западного склона болота при его высоком среднем уровне.

Обсуждение

Полученные результаты статистического анализа показывают высокую степень описания рельефа болота высотой уровня болотных вод и интенсивностью роста мха. Прирост мха описывается от составляющих рельефа и уровня болотных вод на наиболее низком уровне. Уровень болотных вод описывается от высот рельефа и приростов мха несколько лучше. В результате можно сделать вывод, что высота поверхности исследуемого верхового болота практически полностью детерминирована от уровня болотных вод и прироста мха. Приросты мха определяются УБВ и высотами поверхности только для мезо- и макроформ рельефа, а для уровня нано- и микроформ рельефа эти переменные становятся незначимы. Сходная ситуация и с уровнем болотных вод.

С учетом числа и характера выделенных механизмов организации исследуемых переменных можно предположить, что организацию мезо- и макроформ инварианта рельефа определяет механизм с положительным контуром обратной связи в системе роста мха, накопления торфа и увеличения уровня болотных вод (Иванов, 1975). Это классический механизм образования олиготрофных болот, при котором накопление торфа ведет к подъему уровня грунтовых вод, что, в свою очередь, приводит к благоприятным условиям для роста сфагновых мхов, увеличению мощности торфа и дальнейшему подъему уровня воды. Для остальных форм рельефа и переменных, исходя из анализа их спектров, характерен другой общий механизм их организации.

Исходя из имеющихся данных и результатов их анализа, можно предположить, что на высокочастотном уровне динамика рельефа болота определяется локальными условиями роста мха, определяемыми, в свою очередь, высокочастотной составляющей рельефа и связанным с ним локальным варьированием уровня болотных вод, а также саморазвитием растительного покрова. Оптимум уровня болотных вод для произрастания сфагновых мхов для исследуемого болотного массива, исходя из проведенных измерений, около 7–10 см. При большем среднем уровне болотных вод рост мха замедляется в первую очередь для западин рельефа, где происходит подъем УБВ выше поверхности мха. При меньшем УБВ также происходит замедление роста мха, в первую очередь для гряд и кочек, где УБВ падает глубже 15 см. При среднем уровне болотных вод ниже 15 см рост мха практически прекращается. В результате точки активного роста мха превращаются в кочки, на которых скорость роста мха замедляется, практически прекращаясь при достижении высоты кочки 10–15 см над основной поверхностью болота. Вследствие лучшей аэрации органический материал кочки разлагается быстрее, в результате кочка «проваливается» в своей центральной части, образуя понижение, где возобновляется рост мха. Для нано- и микроформ

инварианта рельефа этот механизм совмещается с механизмом, выделенным для мезо- и макроформ рельефа, и, таким образом, его структура является результирующим этих процессов.

Большая амплитуда колебаний высот поверхности в нижней части западного склона болота, возможно, связана с активным горизонтальным ростом болота в западном направлении (около 2 м в год) и колебанием УБВ. Резкое повышение уровня поверхности болота может отражать процесс поднятия акротельма из-за повышения УБВ, связанного с подпором грунтовых вод болотными. Таким образом, акротельм при резком повышении УБВ всплывает, что и повышает высоту поверхности болота. Такая гипотеза подтверждается данными о наличии на глубинах с 60–70 до 110–130 см сильно обводненного горизонта, разделяющего акротельм и катотельм. В результате динамические изменения мощности этого горизонта могут отражаться на уровне поверхности болота. Также, учитывая нахождение болотного массива в западине водораздела, для его западной части, граничащей с основной поверхностью водораздела, возможен латеральный приток грунтовых вод, что может отражаться как на УБВ, так и на высоте поверхности болота.

Заключение

Проведенные измерения характеристик поверхности болота показали комплексный характер организации и динамики высот его поверхности, различающийся для макро-мезоформ и нано-микроформ рельефа. В целом во времени высота поверхности болота практически инвариантна по своей структуре, с небольшими ее нарушениями для западного склона болота. Высоты поверхности болота практически полностью описываются УБВ и приростом мха. При этом прирост мха и УБВ не в полной мере определяются остальными переменными. Таким образом, эти переменные, особенно на высокочастотном уровне, могут зависеть от других факторов, непосредственно не учтенных в данных измерениях, или, в случае мха, являться процессом саморазвития растительного покрова болота.

Выделяется два основных механизма формирования и динамики поверхности болота. Первый, ответственный за выпуклую форму поверхности всего болотного массива и мезоформы рельефа, определяется классическим процессом с положительной обратной связью в системе растительности, накопления торфа и уровня болотных вод. Этот процесс порождает структуру рельефа с топологической размерностью (показатель Хёрста около 1), что отражает его высокую детерминированность. Второй процесс менее детерминирован (показатель Хёрста 0.81–0.87) и определяется локальными особенностями соотношения скоростей роста сфагнумов и уровня болотных вод на фоне саморазвития растительного покрова. Совместно с первым, по всей видимости, он определяет рельеф поверхности болота для его нано- и микроформ.

Динамические изменения высоты поверхности болота в целом связываются с изменениями мощности водонасыщенного горизонта, расположенного между акротельмом и катотельмом. Наибольшая амплитуда высот поверхности характерна для западного склона с активно продвигающимся на основную поверхность водораздела краем болота и высоким варьированием уровня болотных вод при более низком их среднем уровне, что, видимо, связано с периодическим подпором грунтовых вод при нарастании болота на водораздел. Также не исключено влияние латерального стока с прилегающих к болоту территорий, что требует дальнейших исследований.

Библиография

Иванов К. Е. Водообмен в болотных ландшафтах. Л.: Гидрометиздат, 1975. 280 с.
Сысуев В. В., Пузаченко М. Ю. Динамика поверхности и свойства геосистемы верхового болота // Географические основы и экологические принципы региональной политики природопользования. Иркутск: Изд-во Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2019. С. 258–263.

Благодарности

Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ 17-05-00790 А и ГЗ 0148-2019-0007 Института географии РАН.

ORGANIZATION AND DYNAMICS OF ORGANOGENIC RELIEF OF THE RAISED BOG

PUZACHENKO
Mikhail Yuryevich

*PhD, Institute of Geography, Russian Academy of Sciences
(119017, Staromonetny lane, 29, Moscow, Russia),
m.yu.puzachenko@igras.ru*

SHIRONYA
Ivan

*A.N. Severtsov Institute of ecology and evolution of Russian
Academy of the Sciences (Russia, 119071, Moscow, Leninsky
Prospect, 33), ivan.shironya@gmail.com*

Keywords: raised
bog, transect,
relief, bog water
level, moss
accretion

Received on:
05 July 2020

Published on:
06 October 2020

Summary: The work is devoted to the study of the organization of the relief structure and dynamic of the raised bog massif based on multiple measurements on a transect with a regular step of 5 m and a length of 575 m. The transect crosses the slope of the bog massif with a height difference of about 1 m from the edge parts to its center in the sub-latitudinal direction. Long-term measurements of heights showed their significant variation with amplitude of up to 40 cm. To identify possible mechanisms that determine the variation of heights, we measured the moss accretions and the level of bog water at the points of elevation measurement for 5 years. Based on measurements of terrain heights using factor analysis, its invariant and dynamic components in space-time were distinguished. It was found that for the medium-low frequency components of the spectrum of the invariant and dynamic components of the terrain heights, the dimension was topological. The high-frequency component of the spectrum of the invariant component of the terrain had a dimension slightly lower than the topological dimension, and for the dynamic component it was slightly higher than brown noise. The measurements of moss accretions and bog water level also revealed their invariant and dynamic components, which spectrum dimension was similar for all frequencies and slightly higher than brown noise. A joint analysis of measurements of bog surface heights, moss accretions, and bog water levels showed that the invariant and dynamic components of the terrain were almost completely described by the bog water level and moss accretions. At the same time, the invariant and dynamic components of moss accretions and bog water level are determined from the other variables only for large and medium periods of their variation. Thus, there are two main mechanisms for organizing the topography of the bog surface, which differ for its micro and meso-macro forms. Additional mechanisms of organization and dynamics for small periods of their variation may be available for moss growth and bog water level.