

ния» или «разливы»). Затем, по мере зарастания, водоемы превратятся в тростниковые и осоковые болота. В последующем (в течение нескольких десятилетий) в результате зарастания водоемов на таких участках будет формироваться единый болотный массив с ровной поверхностью. В этом случае произойдет восстановление естественных низинных болот и характерного

для них биологического разнообразия. В течение 10-15 лет на всей проектной территории восстановится водно-болотная фауна и флора;

– на возвышенных участках (окраины торфяника, бровки каналов, минеральные острова и др.) будут протекать процессы естественного возобновления леса с последующим формированием насаждений.

### Список литературы

1. Строительный проект «Повторное заболачивание торфяника Погонянское -2, расположенного в Хойникском и Брагинском районах Гомельской области», объект 52/2022 ООО «ПинскЖилПроект», Пинск, – 335 с.
2. Об охране и использовании торфяников [Электронный ресурс] : Закон Респ. Беларусь, 18 дек. 2019 г. № 272-3 // ЭТАЛОН. Законодательство Республики Беларусь / Нац. центр правовой информ. Респ. Беларусь. – Минск, 2022.
3. Охрана окружающей среды и природопользование. Территории. Правила и порядок определения и изменения направлений использования выработанных торфяных месторождений и других нарушенных болот: ТКП 17.12-01-2008 (02120). – Введ. 31.10.2008 г. – Минск : РУП «Бел НИЦ «Экология», 2008. – 13 с.

## МОНИТОРИНГ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ СФАГНОВОГО БОЛОТНОГО КОМПЛЕКСА НА ЮЖНОЙ ГРАНИЦЕ ПОДТАЙГИ ДИСТАНЦИОННЫМИ И НАЗЕМНЫМИ МЕТОДАМИ

Г.А. Шайхутдинова<sup>1</sup>, В.П. Хомяков<sup>2</sup>, К.А. Лисовская<sup>2</sup>, Н.Р. Шафигуллина<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия, gshaykhu@gmail.com, nadiashafigullina@gmail.com

<sup>2</sup>Московский государственный институт международных отношений (университет) МИД России, Москва, Россия, v.hamster04@gmail.com, ksenialisovskaa91@gmail.com

*Представлены результаты реализации программы дистанционных (с помощью беспилотного летательного аппарата) и наземных наблюдений малой охраняемой территории. Построены крупномасштабные карты и профиль мощности торфяной залежи; для прогноза состояния болотного комплекса выполнены расчеты объемов водного стока при различном уровне лесистости площади водосбора. По результатам анализа изменчивости функциональных признаков растений и сфагновых мхов определены оптимальные условия сосуществования видов.*

Важность сохранения болотных экосистем, являющихся уникальными природными комплексами с ярко выраженными регулирующими среду функциями, общепризнана. Для разработки подходов охраны необходимо понимание экологических и биологических особенностей функционирования болотных экосистем как в различных природных, так и антропогенных условиях. Изучаемый болотный комплекс, вытянутой формы, расположен в понижении послеледниковой балки, прорезающей левобережную высокую террасу Волги, в пограничных условиях подтайги и лесостепи, а также болотных зон – верховых сосново-сфагновых и низинных травяных болот, низинных осоковых и тростниковых болот [3]. Экотопы сфагновых болот в Республике Татарстан характеризуются бедностью минерального питания и на уровне болотных массивов относятся к переходному типу, с включением небольших участков болот верхового типа [2]. Общая низкая заболаченность территории Татарстана (0,4%) и редкость сфагновых болот обуславливают необходимость брать подобные комплексы под охрану, тем более, что они в условиях низкой лесистости региона обычно встроены в антропогенные ландшафты. Но из-за малых размеров сфагновые болота республики охраняются в основном в статусе памятников природы регионального значения, что не обеспечивает необходимый уровень защиты и контроль состояния.

Общая площадь изучаемого болотного массива около 10 га. В начале 1960-х гг. полотном трассы А-295 массив был разделен на две части. Северная часть (3,7 га) в 2002 г. вошла в состав охранной зоны Волжско-Камского государственного природного заповедника, южная (6,3 га) с 1981 г. охраняется в статусе памятника природы, вместе с прилегающими участками склонов балки. Ежегодные наблюдения за болотным комплексом и прилегающими экосистемами ведутся с 2018 г. дистанционным и наземными способами.

Дистанционный мониторинг выполняется с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА), которые получили в последние годы широчайшее применение, в том числе в народном хозяйстве и экологических исследованиях [7]. Такой вид наблюдений открывает возможности оперативного отслеживания антропогенных нарушений, особенно для малых охраняемых территорий, которые трудно контролировать. Крупномасштабные съемочные данные, полученные с БПЛА, совместно с результатами наземных наблюдений, обеспечивают выполнение пространственного анализа данных и прогнозного моделирования для разработки программ управления.

Комплексе выполненных наземных исследований включает промеры мощности торфяной залежи и построение продольных профилей глубины залегания торфа; картирование природных и антропогенных эле-

ментов особо охраняемых природных территорий, а также границ водосбора болотного комплекса для расчета объемов водного стока; сбор и анализ ботанических данных – функциональных показателей болотных растений и сфагновых мхов в различных по мощности участках торфяной залежи болотного комплекса для понимания механизмов их адаптации к условиям обитания. К функциональным признакам растений могут быть отнесены любые несистематические признаки (масса семян, высота генеративных или вегетативных побегов, площадь, вес и длина листьев и т.п.), при этом варьирование признаков у видов в сообществах свидетельствует о дифференциации их экологических ниш, характеризует стратегии жизни растений [16], маркирует изменения градиентов среды в ходе сукцессий [4] и служит оценкой филогенетического сигнала [10].

**Оценка и прогноз экологического состояния болотного комплекса.** Аэрофотосъемочные работы (4 года наблюдений) проводились с использованием мультироторного БПЛА DJI Phantom 4, снабженного фотокамерой с разрешением 12 мп, и встроенным высокоточным ГНСС-приемником (ООО «Геоскан», г. Санкт-Петербург), позволяющим автоматически получать координатах местоположения от сети референсных станций и спутников. Управление осуществляли со смартфона с использованием программы «DroneDeploy», позволяющей формировать полетное задание и задавать параметры съемки. Съемка выполнялась на высоте 150 м, продольное перекрытие снимков – 60-80%, поперечное перекрытие снимков – 60-80%, положение камеры – 90°, маршрут – площадная съемка. Фотограмметрические работы и создание 3D-модели территории реализованы в программе Agisoft Photoscan по стандартной методике [6] в следующей последовательности: анализ и отбраковка снимков, построение накладки монтажа и фотопланов, построение облака точек, построение ортофотоплана.

С помощью ручного пробоотборника Eijkelkamp сделаны промеры мощности торфяных залежей обеих частей болотного комплекса по методике [12]. Бурение залежей выполнено точно по всей длине с частотой 30-70 м в южной части и с частотой 20-40 м в северной части. При выборе частоты промеров опирались на изменение состава растительности участков болота и на результаты дистанционных наблюдений. Все пробы торфа, полученные при бурении, имели светло-коричневый цвет, характерный для верхних торфов, и типичную для торфов мохового происхождения губчатую структуру. Координаты каждого места погружения бура фиксировались GPS-приемником. Выполнено 37 промеров: 24 в южной части и 13 в северной. Данные промеров с учетом их координат визуализированы на ортофотоплане, построены продольные профили глубины залегания торфа (рисунок). В южной части болотного комплекса диапазон мощности торфа варьирует от 40 до 400 см, создавая разнообразие болотных экотопов. В северной части, расположенной в охранной зоне заповедника, мощность колеблется от 150 до 800 см. В условиях максимальной мощности залежи формируется мертвопокровный березняк, в верхнем слое которого вероятно уже протекают процессы гумификации и минерализации торфянистой массы [5].

При дешифрировании фотопланов создана библиотека дешифровочных признаков, намечены границы водосборов северного и южного участков болот, построены карты и рассчитаны площади природных и антропогенных элементов ландшафтного комплекса балки в среде ГИС MapInfo Professional. Сравнение фотопланов за 4 года наблюдений позволило зафиксировать систематические нарушения режима охраны памятника природы: сброс мусора на лесной опушке и полянах, заезд мототехники на болото. В первые 2 года наблюдений на безлесном склоне южной части балки, производился интенсивный выпас скота, за два сезона зафиксировано увеличение в 1,5 раза площади эродированных участков и скотобойных троп. В сезон 2020 г. выпас прекратился и сбитые участки начали зарастать.

С использованием рассчитанных значений площадей различных типов покрытия водосбора и коэффициентов среднего многолетнего стока для различных поверхностей [9, 11] по типовым формулам [8] и данным о слое осадков для территории [1] рассчитаны объемы среднего многолетнего водного стока с площади водосбора отдельно для северного и южного участка балки (таблица). Сравнение результатов позволило выполнить прогноз состояния болотных комплексов.

В северной части балки, несмотря на большую водосборную площадь, высокие показатели лесистости показывают низкий уровень объема стока за счет затрат на испарение и транспирацию. При полном зарастании луговых участков лесом, объем стока в северной части балки снизится еще почти в три раза, что может привести к потере болотной экосистемы. В южной части балки из-за невысокой облесенности водосбора величина объема стока выше, чем в северной (см. таблицу, рисунок) и соответственно больше площадь не заросших лесом болот. Дифференциация торфонакопления по длине комплекса обеспечивается неравномерностью водного стока из-за мозаичного покрытия территории лесом и длительным выпасом на прилегающих склонах. В случае зарастания лугов лесом в ходе постпасторальных восстановительных сукцессий, норма стока уменьшится в 4 раза от существующей, и станет в 3,5 раза меньше современной нормы стока для северной части, что неизбежно приведет к упрощению структуры южного болотного комплекса и потере части видовой разнообразия. Для сохранения природоохранной ценности болотного комплекса необходима разработка программы управления, в поддержку величины оптимальной лесистости водосборной площади.

**Анализ изменчивости функциональных признаков растений по градиенту мощности торфяной залежи.** Сбор полевого материала проводился на пробных площадях, заложенных вдоль линии промеров мощности торфяной залежи. Проведены измерения высоты генеративных побегов пяти наиболее постоянных для всех площадок видов (*Menyanthes trifoliata* L., *Comarum palustre* L., *Chamaedaphne calyculata* (L.) Moench, *Betula pubescens* Ehrh., *Frangula alnus* Mill.), собраны и пронумерованы образцы листьев (по 30 шт. для каждого вида на каждой площадке). У каждого листа непосредственно перед сбором с помощью оптического прибора SPAD-502 (Konica-Minolta), измерен коэффициент пропускания листьями света в красной и ин-

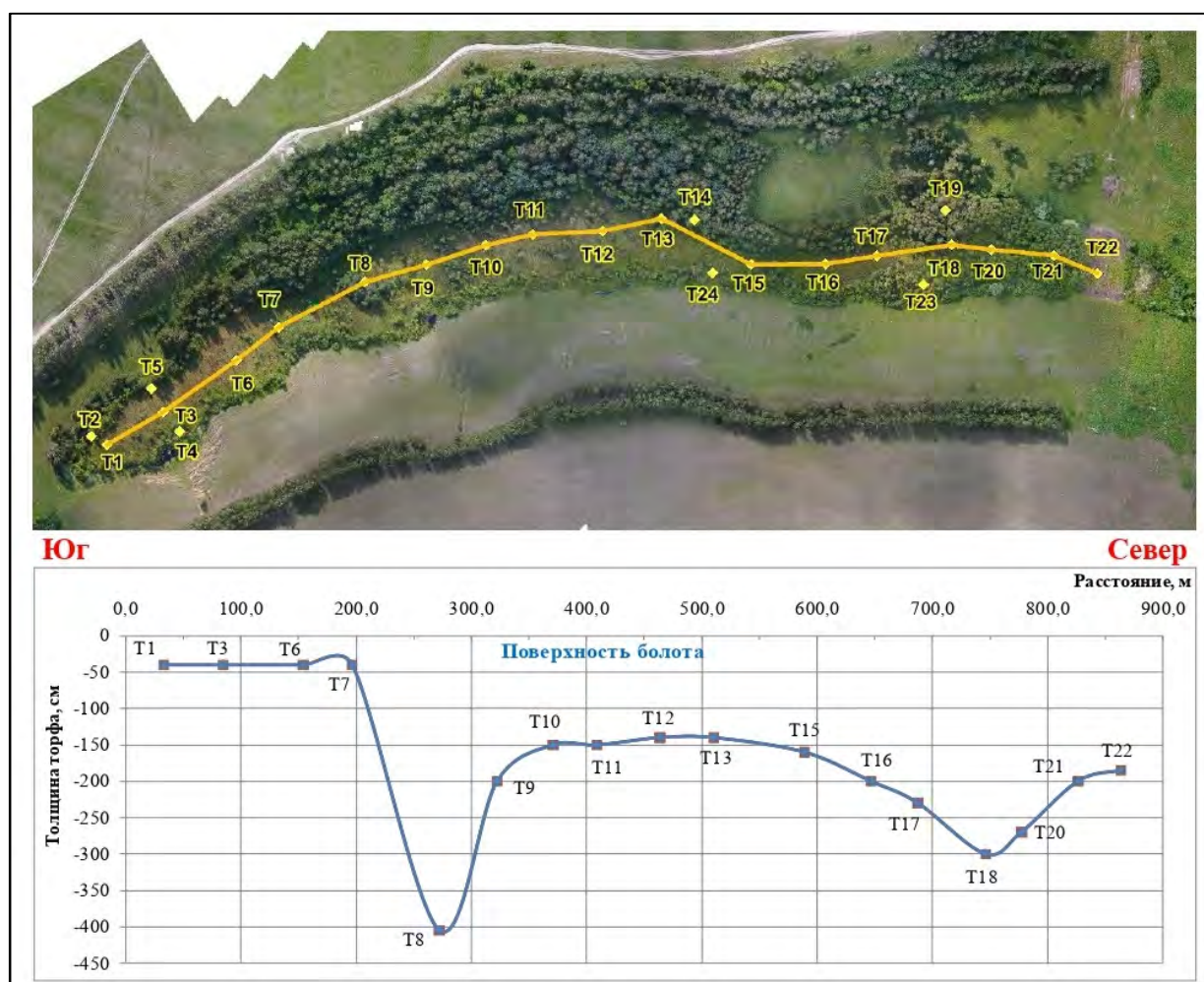


Рисунок – Ортофотоплан с расположением точек бурения и профиль глубины залегания торфяной залежи южной части болотного комплекса

Таблица – Характеристики водосборных территорий и объемы стока участков болотного комплекса

Участок балки	Общая площадь водосбора, км <sup>2</sup>	Облесенные территории		Луговые сообщества		Площадь не облесенных участков болота и водосемов, км <sup>2</sup>	Средний многолетний объем стока, тыс.м <sup>3</sup>
		площадь, км <sup>2</sup>	объем стока, тыс.м <sup>3</sup>	площадь, км <sup>2</sup>	объем стока, тыс.м <sup>3</sup>		
Северный	1,126	0,496	41,3	0,606	230,1	0,024	271,4
Южный	0,971	0,099	8,2	0,816	309,8	0,056	318,03

фрактальной области электромагнитного спектра (SPAD), который пропорционален концентрации хлорофилла в образце [18]. У каждого листа измерены длина с черешком, площадь, сухой вес. Тесноту связи всех измеренных признаков листьев проверяли расчетом коэффициента корреляции Пирсона, с проверкой значимости.

Увеличение мощности торфяной залежи сопровождается удлинением генеративных побегов травянистых видов. По градиенту мощности постепенно увеличивается средняя площадь и длина листа *Menyanthes trifoliata*, *Chamaedaphne calyculata*, *Betula pubescens*. Больше всего значимых связей между значениями функциональных признаков в условиях пушицево-сфагнового (*Eriophorum vaginatum* L., *Sphagnum medium* Limpr., *Sph. angustifolium* (C.E.O. Jensen ex Russow) C.E.O. Jensen) фитоценоза на залежи мощностью 160 см, что свидетельствует о проявлении в этих условиях у видов стратегии настройки признаков, обеспечивающих плотную упаковку экологических ниш. В этих же условиях *Frangula alnus* показывает заметные

отрицательные связи значений SPAD со всеми размерно-весовыми показателями листьев, что видимо связано со снижением содержания хлорофилла при росте размерно-весовых показателей листьев.

Для болотного комплекса в целом характерны пять фоновых видов сфагновых мхов: *Sphagnum fallax* (H.Klinggr.) H.Klinggr., *Sph. medium* Limpr. (*Sph. magellanicum* Brid.), *Sph. flexuosum* Dozy & Molk., *Sph. angustifolium* (C.E.O. Jensen ex Russow) C.E.O. Jensen., *Sph. riparium* Ångstr. Доминирует *Sph. medium*, присутствующий на участках с разной мощностью торфяной залежи. Меньшее обилие у *Sph. angustifolium* и *Sph. fallax*; на участках с большой мощностью торфяной залежи (до 400 см) встречаются *Sph. flexuosum* и *Sph. riparium*. Таким образом, по градиенту увеличения мощности торфа увеличивается видовое разнообразие сфагновых мхов.

Образцы сфагновых мхов отбирались с помощью рамки 10x10 см, у каждого образца измерялась масса и количество побегов для определения плотности дерновины. Плотность побегов рассматривается как ключе-

вой функциональный признак водного баланса сфагнума [15, 17]. Побеги сфагнума вытягиваются на одну высоту, образуя своими макушками более или менее плотную дерновину с равномерной фотосинтетической поверхностью. Чем больше показатель гладкости поверхности, тем меньше будет испаряться влаги, что способствует выживаемости сфагнума и придает колонии ее влагоудерживающие свойства. Показателями наибольшей плотности отличаются поверхности, образованные в основном мелкими побегами. Кроме того, плотность побегов положительно коррелирует с массой образца. Наибольшая масса и плотность побегов наблюдалась у образцов *Sphagnum angustifolium* и *Sphagnum flexuosum*, побеги которых мельче остальных. Плотность побегов и масса образцов дерновин уменьшались с градиентом увеличения мощности торфяной залежи.

По геоботаническим описаниям, выполненным на пробных площадях, определены экологические условия с помощью фитоиндикационных шкал Элленберга [14], регионализированных для Республики Татарстан

[13]. Расчётом коэффициента корреляции Пирсона проверили тесноту связи экологических характеристик участков и массы образцов дерновин мхов. В наиболее экстремальных условиях (избыточное увлажнение, высокая кислотность, интенсивное освещение, бедность элементами питания) сфагновые мхи отличаются большей массой и плотностью, но низким видовым разнообразием. Такие условия характерны для участка болота с минимальной мощностью торфяной залежи 40 см.

Таким образом, увеличение мощности торфяной залежи изменяет доступность необходимых для роста и развития растений ресурсов и условия конкуренции за них. Согласно полученным результатам, участки с мощностью торфа 150–200 см предоставляют наиболее благоприятные условия для сосуществования сфагновых мхов с прочими видами болотного комплекса, обеспечивая у последних плотную упаковку ниш за счет варьирования функциональных признаков. Сохранение равновесия возможно обеспечить через регулирование водного баланса водосборной территории, поддерживая ее часть в беслесном состоянии.

### Список литературы

1. Атлас Республики Татарстан. – Производственное картосоставительское объединение «Картография», Москва, 2005. – 211 с.
2. Бакин О.В., Шафигуллина Н.Р. Флора листостебельных мхов болот Татарстана. Ученые записки Казанского университета. Серия Естественные науки. Том 154, кн. 1. – 2012. – С. 155–164.
3. Боч М.С., Мазинг В. В. Экосистемы болот СССР. – Л.: Наука, 1979. – 188 с.
4. Василевич В.И. Функциональное разнообразие растительных сообществ. Ботанический журнал. Т. 101. № 7. – 2016. – С. 776–795.
5. Глазковская М. А. Общее почвоведение и география почв. – М.: Высшая школа, 1981. – 400 с.
6. Инструкция по фотограмметрическим работам при создании цифровых топографических карт и планов ГКИНП (ГНТА)-02-036-02. Федеральная служба геодезии и картографии России. Геодезические, картографические инструкции, нормы и правила. – Москва, ЦНИИГАиК, 2002. – 101 с.
7. Лабутина И.А., Балдина Е.А. Использование данных дистанционного зондирования для мониторинга экосистем ООПТ. Методическое пособие. – Москва, 2011. – 90 с.
8. Михайлов В.Н., Добровольский А.Д., Добролюбов С.А. Гидрология: Учебник для вузов. – 2-е изд. испр. – М: Высшая школа. – 2007. – 463 с.
9. Молчанов А.А. Влияние леса на окружающую среду. – Москва: Изд-во «Наука», 1973. – 359 с.
10. Онипченко В.Г., Дудова К.В., Гулов Д.М. и др. Функциональные признаки листьев растений важны для формирования состава альпийских растительных сообществ. Журнал общей биологии. – 2022. – Т. 83. – № 2. – С. 127–137.
11. Принципы выделения защитных лесных полос. Коллектив авторов. Отв. ред. чл.-кор. АН СССР А.А. Молчанов; АН СССР, Лаб. лесоведения. – Москва: Наука, 1977. – 147 с.
12. Филиппов Д.А., Прокин А.А., Пржиборо А.А. Методы и методики гидробиологического исследования болот: учебное пособие / под ред. проф. А. В. Толстикова. – Тюмень: Издательство Тюменского государственного университета, 2017. – 208 с.
13. Шагиев Б.Р. Вероятностная оценка пула видов растительных сообществ на основе региональных экологических шкал: автореф. дис. на соиск. учен. степ. к. б. н. : специальность 03.02.08 «Экология по отраслям» / Шагиев Булат Ринатович; [Казан. (Приволж.) федер. ун-т]. – Казань, 2012. – 21 с.
14. Ellenberg H. Zeigerwerte der Gefasspflanzen Mitteleuropas. – Gottingen: Goltze, 1974. – 97 s.
15. Elumeeva T.G., Soudzilovskaia N.A., During H.J., Cornelissen J.H.C. The importance of colony structure versus shoot morphology for the water balance of 22 subarctic bryophyte species. Journal of Vegetation Science. – No 22, 2011. – P. 152–164. doi: 10.1111/j.1654-1103.2010.01237.x.
16. Garnier, E. Navas M.-L., Grigulis K. Plant functional diversity. Organism traits, community structure and ecosystem properties. – Oxford, Oxford University Press, 2016. – 231p.
17. Laing C.G., Granath G., Belyea L.R. et al. Tradeoffs and scaling of functional traits in Sphagnum as drivers of carbon cycling in peatlands. – Oikos. – No 123, 2014. – P. 817–828. doi: 10.1111/oik.01061.
18. Ling Q., Jarvis P., Huang W. Use of SPAD-502 meter to measure leaf chlorophyll concentration in Arabidopsis thaliana. Official Journal of the International Society of Photosynthesis Research. – No. 107, 2010. – P. 209–214.