

## МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 581.526

### ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИКИ ЗАРАСТАНИЯ ЛИТОРАЛИ ПСКОВСКОГО ОЗЕРА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ДАННЫХ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ (ДЗЗ)

К. Б. Михайлова<sup>1</sup>, С. Г. Михалап<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Псковский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Россия

<sup>2</sup> Псковский государственный университет, Россия

Представлены результаты оценки пространственно-временной динамики зарастания гелофитной растительностью литоральной зоны Псковского озера за период с 1989 по 2019 г. Псковское озеро отличается мелководностью, повышенным уровнем трофии, ежегодными колебаниями уровня режима, наличием большой площади литоральной зоны (около 15 % от площади водного зеркала водоема). Основные вышеперечисленные факторы, в совокупности с глобальным потеплением климата, создают благоприятные условия для развития высшей водной растительности. Дается подробный анализ истории изучения акватории, приводятся типы зарастания озера в различные годы исследований с указанием преобладающих экологических групп и доминирующих видов. Для Псковского озера характерен гелофитный – «фрагментарно-поясный» тип зарастания. Проведен анализ литературных данных, собственных полевых исследований и тематическая обработка мультиспектральных спутниковых снимков разных лет. Процесс зарастания литорали за рассматриваемый период носит флуктуирующий характер с положительной трендовой составляющей. В маловодные годы отмечено увеличение встречаемости прибрежно-водных растений. Прирост гелофитов относительно конфигурации усредненной береговой линии колебался в пределах от 26,56 до 641,9 га, что составило 0,04–0,9 % общей площади водоема. Рассматриваются изменения по годам основных структурных показателей тростника южного (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. et Steud., 1840) – эдификатора, которому принадлежит ведущая роль в зарастании Псковского озера. За период наблюдений отмечается увеличение показателей плотности зарослей и биомассы этого гелофита.

Ключевые слова: ДЗЗ – дистанционное зондирование земли; зарастание; литораль; Псковское озеро; динамика; гелофитная растительность.

**K. B. Mikhailova, S. G. Mikhalap. EXPLORATION OF HELOPHYTE GROWTH DYNAMICS IN THE PSKOVSKOE LAKE LITTORAL ZONE USING REMOTE SENSING DATA**

The article presents the results of an assessment of the spatio-temporal dynamics of the Pskovskoe Lake littoral zone overgrowing with helophytes in the period from 1989

to 2019. Lake Pskovskoe is a shallow body of water with a high trophic status, annual water level fluctuations, and an extensive littoral zone (about 15 % of the water surface area). The said factors, coupled with global warming, create favorable conditions for the expansion of higher aquatic vegetation. A detailed analysis of the history of research of the lake water area is provided. The types of the lake overgrowing in different years with indication of the prevalent ecological groups and dominant species are suggested. Lake Pskovskoe is characterized by the helophytic – “fragmentary-belt” type of overgrowing. Data from the literature and own field data were analyzed; multispectral satellite images taken in different years were thematically processed. The process of littoral overgrowing in this period has been fluctuating, with a positive trend component. In low-water years, the occurrence of helophytic plants increased. The expansion of helophytes in relation to the averaged shoreline configuration ranged from 26.56 to 641.9 ha, i. e. 0.04–0.9 % of the lake total area. The largest helophyte expansion was noted at Talabsk station, where the overgrown area gained 7.5 hectares in the period from 2007 to 2017. Among-year changes of the main structural parameters of the southern reed (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. Et Steud., 1840), the species playing the key role in the overgrowing of Lake Pskovskoe, are analyzed. The density and biomass of the reed stands have increased over the period of observations.

**Key words:** remote sensing of the Earth; overgrowing; littoral zone; Lake Pskov; dynamics; helophytic vegetation.

## Введение

На долю пресных внутренних водоемов приходится менее одного процента общемировых запасов воды, однако они играют ключевую роль в поддержании стабильности естественных природных комплексов, обеспечивая местообитаниями более 100 тысяч известных видов и формируя уникальные природные сообщества [Dudgeon et al., 2006; Palmik et al., 2013].

Псковское озеро – южная часть Чудско-Псковского озера, относящегося к бассейну Финского залива Балтийского моря и расположенного на границе двух государств – России и Эстонии. Этот крупнейший на Северо-Западе РФ трансграничный пресный водоем имеет большое рыбохозяйственное значение, выполняет роль транспортной магистрали и является источником снабжения пресной водой многочисленных населенных пунктов, размещенных на его берегах.

При формировании экосистем внутренних водоемов важнейшую функцию выполняет высшая водная (макрофитная) растительность. Макрофиты способствуют формированию первичной продукции водоема, оказывают значительное влияние на накопление и стабилизацию донных отложений, принимают участие в круговороте биогенных элементов и создают местообитания и источники пищи водной и полуводной биоты [Jeppesen et al., 2012]. Помимо этого сообщества макрофитов также способствуют формированию целого комплекса экосистемных услуг, таких как производство сельскохозяйственного сырья, рекреационные возможности и очистка

природных вод [Engelhardt, Ritchie, 2001; Hilt et al., 2017].

Зарастание – это естественный процесс экосистемной динамики любого пресного непроточного или полупроточного водоема. Умеренное зарастание (до 20 % площади акватории), согласно данным некоторых авторов, положительно влияет на развитие прибрежной фауны, создавая благоприятные условия для обитания животных различных видов [Садчиков, Кудряшов, 2004]. Водоемы с биомассой растительности до 25 т/га практически не оказывают негативного воздействия на формирование их продуктивности. Но когда биомасса растительности становится чрезмерной (более 25 т/га), площадь, занимаемая ими, достигает свыше 50 %, негативный эффект становится все более очевидным. Вследствие этого на нерестилищах наблюдается снижение рыбопродуктивности на 20–40 %. Избыток макрофитов при этом, поглощая биогенные элементы, ослабляет интенсивность всех дальнейших продукционных процессов, последовательно снижая биомассу фито- и зоопланктона [Чавычалова, Кушнарченко, 2008]. Степень и скорость зарастания озер определяются целым рядом факторов, среди которых особенно выделяются два: мелководность и трофический уровень водоема [Ниценко, 1967; Гигевич, 1991]. Одним из основных факторов, определяющих зарастание, также является колебание уровня режима водоема.

В зарастании озера участвуют как погруженные водные растения (гидрофиты), так и воздушно-водные, или гелофиты [Папченков, 2001]. Подъем уровня воды, как правило, негативно сказывается на сообществах прибреж-

но-водных растений, приводя к значительному сокращению площади зарастания водоемов [Hudon et al., 2005]. Маловодные годы благоприятны для развития и продуцирования гелофитов. Однако при дальнейшем понижении уровня, его стабилизации и меньших амплитудах колебаний многие сообщества прибрежно-водной растительности произрастают уже не в воде, но на обсохших частях побережья. Происходит постепенное заболачивание водоема за счет постоянного отложения растительных остатков на дно [Денисова и др., 1999].

Водность тесно связана с другим климатическим фактором – тепловым режимом водоема. Водосбор Чудско-Псковского озера располагается в области перехода от океанического климата к континентальному, из-за чего «данная территория представляет собой весьма изменчивую природную систему, четко реагирующую на климатические изменения» [Шевкунова и др., 2001]. В последние годы в Псковском озере наблюдается устойчивая тенденция к увеличению продолжительности периода «открытой воды» и повышению его теплообеспеченности. По данным гидрометеостанции на о. Залита, в Псковском озере наблюдается повышение температуры воды в апреле (0,33 град. за 10 лет), мае и июле (0,24 град. за 10 лет), но понижение в сентябре и декабре. В целом температура в Псковском озере за указанное время повысилась на 1,2 градуса (по материалам Псковского областного центра по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (ЦГМС) по Псковскому озеру на водном посту острова им. Залита). Глобальные средние температуры воздуха выросли на  $0,74 \pm 0,18$  °C, если оценивать по линейной тенденции за последние 100 лет (1906–2005 гг.). Скорость потепления за последние 50 лет почти вдвое выше, чем за последние 100 лет [Nöges et al., 2009]. Исследования климата Эстонии показывают, что во второй половине XX столетия температура воздуха поднялась на 1–1,7 °C. Максимальный прирост температуры относится к весеннему периоду [Jaagus, 2003], когда влияние температурных изменений на растительный и животный мир является наиболее интенсивным. Влияние на водные экосистемы выражается в раннем ледоходе, увеличении вегетационного периода и росте продуктивности водоемов [Irigoiien et al., 2000].

Воздействия климатических переменных (особенно температуры и инсоляции, а также осадков и ветра) – важных движущих сил процессов в пресноводных экосистемах, описаны в ряде исследований региона Балтийского моря [Smith et al., 2008].

Заиление грунтов и общее потепление климата способствуют интенсивному распространению воздушно-водных растений в береговой зоне. Площадь, занятая высшей водной растительностью (в процентах от площади водного зеркала), растет с уменьшением средней глубины озер и с увеличением площади литорали (глубина менее 1–2 м) [Драбкова, Сорокин, 1979].

Макрофитная растительность Чудско-Псковского водоема, и Псковского озера в частности, изучалась спорадически с 50-х годов прошлого столетия [Иванов, 1966; Тувикене, 1966; Недоспасова, 1974; Мяметс, 1983; Судницына, 1990]. С 2007 г. макрофиты, как важнейший компонент гидроэкосистемы, включены в объекты экологического мониторинга Чудско-Псковского озера.

По данным первых исследователей Лиррмаа [1928] и В. А. Монюшко [1927], берега Чудско-Псковского водоема зарастают слабо ввиду сильного их размыва. У берегов Псковского озера эстонский ботаник Лиррмаа описал встречаемость воздушно-водных растений: тростника, камыша, а также настоящих водных: кубышки и кувшинки, рдеста пронзеннолистного и рдеста плавающего. По его наблюдениям, тростник наступает и вытесняет водные формы, которые вынуждены отступать в сторону открытой воды. Таким образом, зарастание озера в этот период (до Второй мировой войны) можно отнести к первому типу: «сильно фрагментарное» [Синкявичене, 1992].

Второй тип – «фрагментарное» зарастание, отмечен в Псковском озере в середине прошлого века В. В. Ивановым [1949] и Х. М. Тувикене [1966]. Облик растительности, по их данным, определяли три вида: *Phragmites australis* (Cav.) Trin. et Steud., 1840, *Schoenoplectus lacustris* (L.) Palla, 1888 и *Potamogeton perfoliatus* L., 1753. Пионером зарастания в Псковском озере был назван *Phragmites australis*, на его долю приходилось 80 % зарослей, на долю других гелофитов (*Schoenoplectus lacustris*, *Typha angustifolia* L., 1753, *Sparganium erectum* L., 1753 и др.) – не более 10 %.

В период с 1966 по 1970 г., согласно данным Г. В. Недоспасовой [1974], зарастаемость Псковского озера составляла 5 % от общей площади водоема. При этом площади, занятые гелофитами и погруженными растениями, были примерно одинаковые (48,6 и 50,9 % соответственно). По занимаемой площади и роли в зарастании озера преобладали те же три вида: *Phragmites australis*, *Schoenoplectus lacustris* и *Potamogeton perfoliatus*. Наибольшее разнообразие видов и сообществ, а также степень зарастания были отмечены

ею в Псковском озере. Сообщества воздушно-водных растений, преимущественно тростника и камыша, образовывали разреженную полосу шириной 200–500 м. Средняя биомасса тростника (воздушно-сухой вес) составила 130 г/м<sup>2</sup>. Заросли рдеста располагались пятнами обычно на большом расстоянии от берега (иногда до 1–2 км) на глубине от 1,5 до 3 м. Средняя биомасса – 690 г/м<sup>2</sup>. По описаниям тип зарастания озера можно определить как «прибрежно-фрагментарный».

Процесс зарастания Чудско-Псковского озера значительно усилился в начале 70-х годов, которые характеризовались повышением биогенной нагрузки на водоем, а также теплой погодой и понижением уровня воды, приведшими к расширению мелководий [Капутерко и др., 1985; Kangur, Möls, 2008]. На мелководных участках начали активно распространяться прибрежно-водные растения. Основная роль принадлежала гелофитам.

По данным Д. Н. Судницыной [1990], в конце 80-х годов на прибрежных мелководьях Псковского озера почти сплошной полосой располагались заросли высокотравных гелофитов, среди которых преобладали довольно плотные (64–118 побегов на 1 м<sup>2</sup>) монодоминантные сообщества тростника южного. Прибрежно-водная растительность отсутствовала лишь на небольших участках вблизи ряда населенных пунктов. Погруженные макрофиты были представлены преимущественно зарослями рдестов разной плотности, которые располагались отдельными пятнами на границе группировок тростника или на некотором удалении от них. По сравнению с данными Г. В. Недоспасовой, биомасса тростника стала выше (достигала 900 г/м<sup>2</sup>), биомасса рдеста пронзеннолистного уменьшилась примерно в 10 раз (значения упали до 58–70 г/м<sup>2</sup>). В Псковском озере появились сообщества, образованные *Stuckenia pectinate* (L.) Börner и *Eleocharis palustris* (L.) Roem. & Schult., 1810, которые ранее здесь не отмечались. В зарослях высших растений были отмечены большие скопления зеленых нитчатых водорослей (преимущественно рода *Cladophora*). Общая зарастаемость Псковского озера составила 7,9 % [Судницына и др., 1990]. Тип зарастания – «прибрежно-фрагментарный».

В 2004–2006 гг. сотрудниками Псковского отделения ФГБНУ «ГосНИОРХ» проводились рекогносцировочные обследования прибрежных зон Чудско-Псковского водоема для анализа полученных данных по высшей водной растительности и создания программы мониторинга макрофитов. Зарастаемость Псковского озера составила примерно 12 %.

В прибрежной зоне преобладали монодоминантные ассоциации тростника южного. Заросли довольно плотные (64–118 побегов на 1 м<sup>2</sup>), достигали высоты до 3 м, образовывали сплошной пояс, местами выдвигались в озеро на расстояние до 400 м. Погруженные макрофиты были представлены преимущественно зарослями рдестов разной плотности, которые располагались отдельными пятнами на границе группировок тростника или на некотором удалении от них. Тип зарастания можно определить как «фрагментарно-поясный».

Почти такую же картину зарастаемости озера отмечали и в последующие годы [Судницына, Михайлова, 2016].

С 2007 г. на Чудско-Псковском водоеме сотрудниками Псковского отделения ФГБНУ «ГосНИОРХ» (после реорганизации отраслевых рыбохозяйственных институтов – Псковский филиал «ВНИРО») ведется регулярный мониторинг высшей водной растительности в рамках «Соглашения между правительствами России и Эстонии по сотрудничеству в области охраны и рационального использования трансграничных вод» от 19 апреля 1996 г.

В течение 2007–2019 гг. в рамках мониторинга нами совместно с эстонскими коллегами изучались геоботанические особенности и структурные показатели тростника южного с целью выявления его роли в зарастании Чудско-Псковского озера. Исследования показали, что в настоящее время заросли тростника распространены в Псковском озере вдоль всей береговой линии, а также окружают многочисленные острова. В целом ширина зарослей тростника колеблется от 50 до 1000 м и зависит в первую очередь от ширины отмели. Глубина, на которой встречается в озере тростник, изменяется от 0,3 до 1,6 м. Тростник распространяется не только в озеро, но и на берег, вызывая зарастание болотистых лугов.

Таким образом, зарастание Чудско-Псковского озера образуют прежде всего устойчивые сообщества тростника южного, камыша озерного и рдеста пронзеннолистного.

В зарастании берегов Псковского озера основная роль принадлежит тростнику южному – самому мощному эдификатору, сообщества которого способны вытеснять другие растения [Садчиков, Кудряшов, 2004]. Второе место занимает камыш озерный. Для Псковского озера характерен гелофитный тип зарастания [Гигевич и др., 1999].

По результатам обработки спутниковых снимков за период с 1988 по 2017 г. средняя площадь, занимаемая гелофитами, составила 4,14 % [Михайлова, Михалап, 2019].

Однако полученные данные по степени зарастания Псковского озера требуют верификации, что объясняется нерегулярностью исследований и отсутствием системы постоянного мониторинга до 2007 г.

Представление о степени развития сообществ прибрежно-водной растительности по акватории позволяет оценить экологическое состояние водоема, что важно для целого ряда экологических исследований.

Цель работы – выявить динамику зарастания литоральной зоны Псковского озера гелофитной растительностью в период с 1989 по 2019 г.

### **Физико-географическая характеристика района исследований**

Псковское озеро (площадь 708 км<sup>2</sup>) почти полностью находится на территории Российской Федерации, характеризуется относительной мелководностью (средняя глубина 3,8 м, максимальная – 5,3 м) и наличием низких заболоченных берегов. Протяженность озера с севера на юг составляет 41 км, средняя ширина – 17 км [Чудско-Псковское..., 1983]. Дно озера преимущественно покрыто озерным илом. На прибрежных территориях встречается песок. Средний показатель цветности составляет 52°, прозрачность воды в среднем 0,6 м. Концентрация общего и минерального фосфора в поверхностном слое Псковского озера в безледный период 1997–2006 гг. составила соответственно 150 и 36 мг/м<sup>3</sup>; концентрация общего азота – 1028 мг/м<sup>3</sup> [Милиус, Халдна, 2012]. По химическому составу воды Чудско-Псковского озера относятся к гидрокарбонатному классу, к группе кальция [Куллус, Мерила, 1966; Костюченко и др., 1974; Starast et al., 1999]. По уровню трофии Псковское озеро является эвтрофным с признаками гипертрофии водоемом [Laugaste, Lessok, 2004]. Таким образом, мелководность и повышенный уровень трофии Псковского озера создают оптимальные условия для зарастания данного водоема.

### **Материалы и методы**

В качестве исходного материала для анализа зарастания Псковского озера использованы спутниковые снимки Landsat 5 (TM) и 8 (OLI) разных лет с минимальной облачностью, отражающие состояние прибрежно-водной растительности в водоеме. В итоге было выбрано 8 сцен за июнь–июль 1989, 1999, 2000, 2001, 2002, 2011, 2013 и 2019 гг.

Для проверки качества дешифрирования снимков использовались данные собственных

мониторинговых исследований, проведенные сотрудниками Псковского отделения ФГБНУ «ВНИРО» в рамках Соглашения между правительствами России и Эстонии по сотрудничеству в области охраны и рационального использования трансграничных вод.

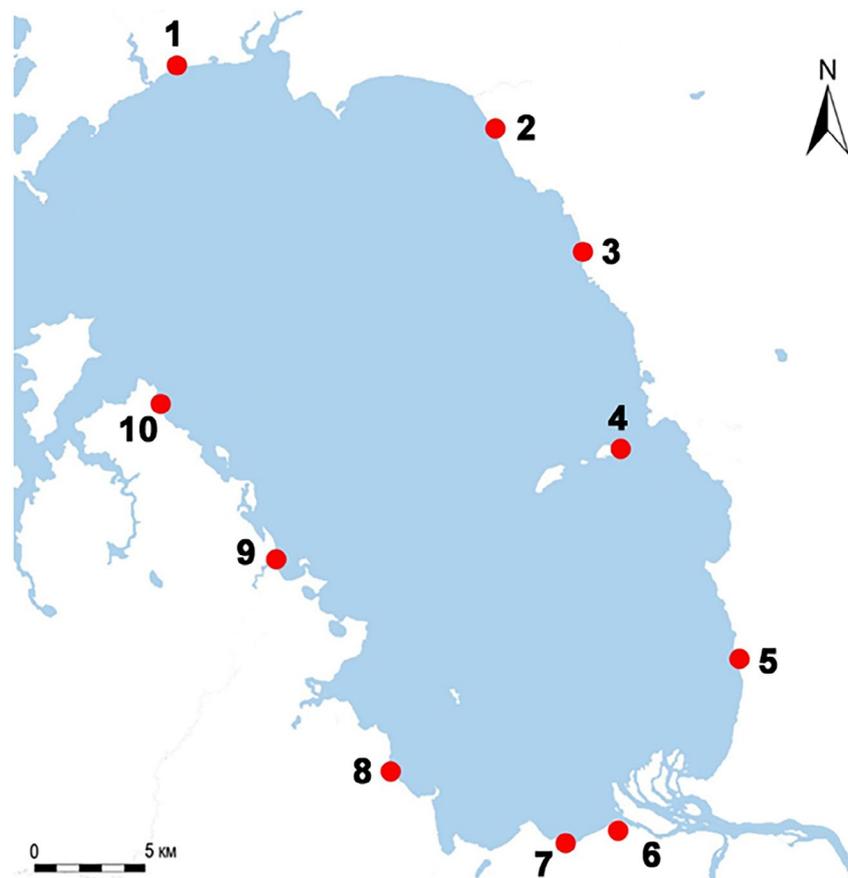
Полевые геоботанические исследования осуществлялись нами с 2007 г. в рамках общеэкологического мониторинга Чудско-Псковского водоема. Изучение высшей водной растительности Псковского озера проводилось в конце июля – начале августа на 10 стационарных станциях (трансектах) с использованием общепринятых методов [Белавская, 1979; Катанская, 1981] (рис. 1). Трансекта представляет собой учетную полосу вдоль береговой линии размером 20–50 м. Растительность описывалась стандартным методом экологических (геоботанических) профилей. Профили закладывались от границы озера, которую определяли по «плавнику» на суше, до исчезновения погруженных растений на глубине. Описание начинали с характеристики прибрежной растительности. По профилю отмечалась протяженность отдельных ассоциаций и проводились геоботанические описания с взятием укосов для дальнейшего определения надземной биомассы.

Описания растительных сообществ проводили на пробных площадках размером 4–10 м<sup>2</sup> или, при малых размерах ценозов, в их естественных пределах.

Определение фитомассы тростника южного – основного эдификатора среди гелофитов производилось на учетных площадках размером 0,25 м<sup>2</sup>. Площадки закладывались на профиле в нескольких повторностях. С учетной площадки срезались у поверхности грунта все растения и взвешивались. После взвешивания сырых укосов измеряли высоту и диаметр (у корня) побегов, подсчитывали их количество. Затем брали навеску из нескольких стеблей для дальнейшей обработки. В лаборатории навеску взвешивали, высушивали в сушильном шкафу при температуре 85 °С. Абсолютно сухая масса навески потом пересчитывалась на вес всего укоса. Фитомассу выражали в абсолютно сухом виде в г/м<sup>2</sup>.

Для выявления динамики биомассы тростника за период с 2007 по 2019 г. анализировали данные четырех станций: Зимний Борок, Жидилов Бор, Мешколь, Баглицы. Проводили сравнение средних значений надземной биомассы (в абсолютно сухом виде) на этих трансектах за 1 год.

На каждой станции (трансекте) ежегодно подсчитывали количество прибрежно-водных растений. Прибрежно-водные растения – группа, объединяющая воздушно-водные растения и растения уреза воды [Папченков и др., 2003].



*Рис. 1.* Расположение Псковского озера и основные точки полевых исследований:  
 1 – Балсово; 2 – Баглицы; 3 – Мешоколь; 4 – Талабск; 5 – Жидилов Бор; 6 – Большая Листовка; 7 – Видовичи; 8 – Зимний Борок; 9 – устье р. Пимжа; 10 – Дрисливик

*Fig. 1.* Location of Lake Pskov and the main points of field research:

1 – Balsovo; 2 – Baglicy; 3 – Meshokol'; 4 – Talabsk; 5 – Zhidilov Bor; 6 – Bol'shaya Listovka; 7 – Vidovichy; 8 – Zimnij Borok; 9 – the mouth of the Pimzha River; 10 – Drislivik

Для оценки зависимости числа видов прибрежно-водных растений и биомассы тростника от ежегодных колебаний уровня воды в Псковском озере был использован корреляционно-регрессионный анализ.

Общий характер зарастания и его динамика во многом определяются цикличностью гидрологического режима, климатическими флуктуациями и антропогенным влиянием. Уровень воды и, как следствие этого, количество воды и площадь акватории в Псковском озере могут изменяться в широких пределах. Большая часть берегов не имеет четких границ. Урез воды в многоводные годы теряется в зарослях тростника, в маловодные – располагается перед зарослями (весь тростник на берегу).

Поскольку конфигурация зарослей гелофитов в значительной степени зависит от уровня воды и площади водного зеркала, в ряде случаев по данным как полевых исследований, так и методов дистанционного зондирования

земли (ДЗЗ) бывает достаточно затруднительно сделать вывод о том, действительно ли площадь является вновь образовавшейся или же это результат годовых флуктуаций площади водного зеркала, в ходе которых часть макрофитов просто затопляется и делает их трудноидентифицируемыми на космических снимках. Для решения этой проблемы мы получили ряд конфигураций площадей водного зеркала Псковского озера с 1989 по 2019 г. и обобщили информацию о них в QGIS для создания усредненной береговой линии озера – условной границы, которая без учета уровня воды позволила бы выявить площадь прироста гелофитов в глубь акватории озера и игнорировать те заросли, которые остались на материковой части. Информация о площадях водного зеркала была получена с сайта Геологической службы США (USGS, <https://glovis.usgs.gov/>) в виде мультиспектральных снимков спутников Landsat 5 (TM) и 8 (OLI) из репозитория данных проектов

Global Land Analysis and Discovery (GLAD) [Pickens et al., 2020] и Global Surface Water – Data Access [Pekel et al., 2016]. Каждый из упомянутых проектов имеет подробное методическое описание содержащейся в нем картографической информации и особенностей работы с ней.

Все этапы подготовки данных ДЗЗ и их последующая обработка осуществлялись в геоинформационной среде QGIS 3.8 и пакете Microsoft Excel. Для построения конфигурации водного зеркала Псковского озера в каждый отдельный год использовался соответствующий растровый снимок с данными, содержащими информацию о водности территории в рассматриваемый период в процентах. Далее на основе каждого растра создавались изолинии с регулярным шагом в 10 % и для построения конфигурации водного зеркала выбирались те из них, которые описывали контур по пикселям, покрытым водой 90 % времени года или выше. Для определения «среднегодовой береговой линии» озера все растровые изображения подвергались усреднению при помощи инструмента «калькулятор растров» в программе

QGIS, после чего на основе этого усредненного растра строились изолинии по вышеописанному алгоритму. Именно эта линия использовалась в дальнейших процедурах по определению степени зарастания озера (рис. 2).

Заросли гелофитов определяли по натурным съемкам и идентифицировали при помощи многоканальных спутниковых снимков Landsat 5 и 8. Данные анализировали, используя различные комбинации каналов Landsat, подбираемые для наилучшей визуализации зарослей гелофитов. Для оценки зарастания Псковского озера была выбрана комбинация каналов 4–3–2 для Landsat (TM) и 5–4–3 для Landsat 8 (OLI), в которой растительные сообщества представлены многообразием оттенков красного цвета. Корректность результатов дешифрирования проверялась данными полевого картографирования участков зарастания.

На первом этапе производилась радиометрическая и атмосферная коррекция данных при помощи плагина для QGIS Semi-Automatic Classification Plugin (SCP). Затем одноканальные снимки Landsat объединялись в единый

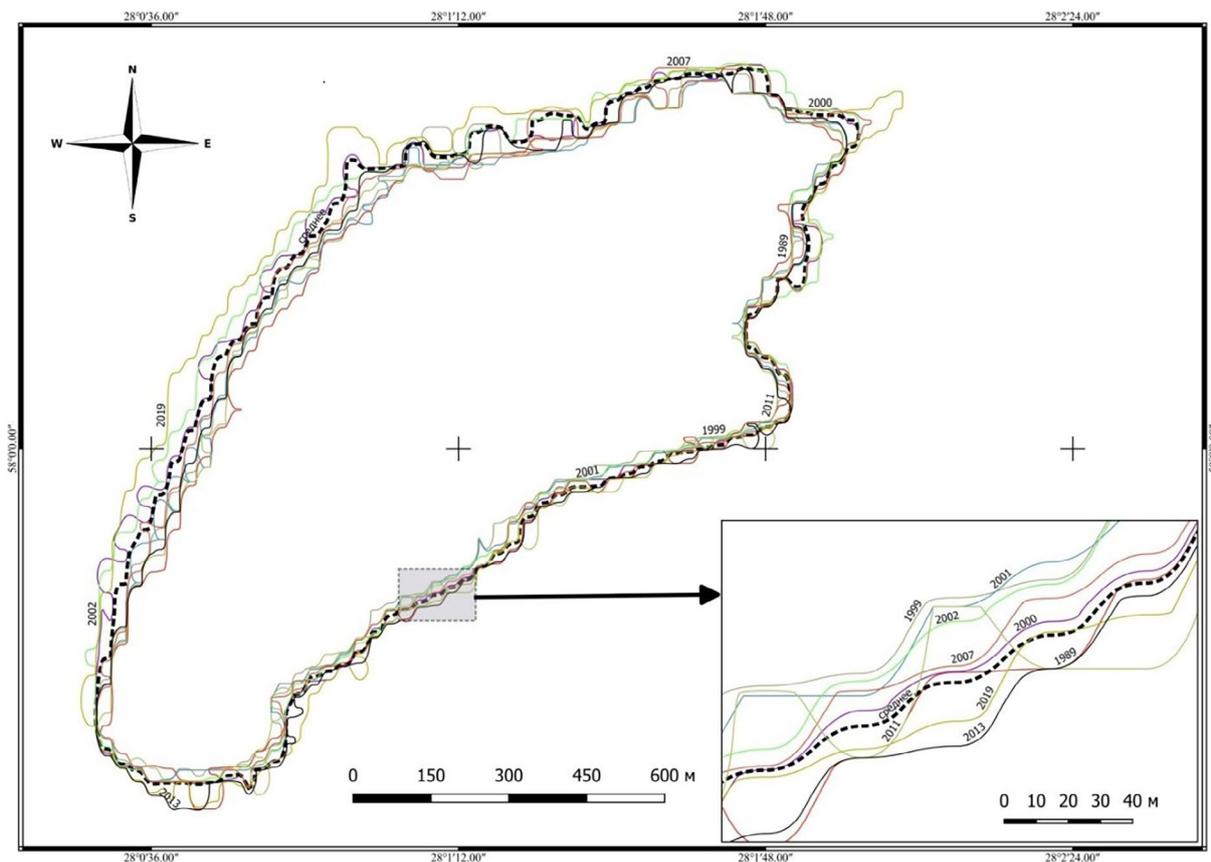


Рис. 2. Конфигурация усредненной береговой линии и линий ряда отдельных лет на примере острова Белов, входящего в группу Талабских островов Псковского озера. Усредненная береговая линия отмечена пунктиром  
Fig. 2. Configuration of the average coastline (dotted line) and lines of a number of years using the example of Belov Island (Lake Pskov)

многоканальный снимок для каждого года наблюдения при помощи инструмента «Объединение» в программе QGIS.

Далее осуществлялась дешифровка изображений с целью выявления конфигурации зарослей прибрежно-водных растений в Псковском озере. Так как полностью погруженные растения практически не идентифицируются при проведении процедуры классификации, в анализ были включены только гелофиты, хорошо распознаваемые при дешифровке. Растения данной группы занимают прибрежные мелководья с глубиной до 1–2 м [Папченков и др., 2003]. В качестве основного инструмента для дешифровки использовалась процедура классификации с обучением, включенная в модуль SCP. После выбора наиболее удачного варианта классификации и коррекции все изображения переводились в векторный формат, и при помощи инструмента «калькулятор полей» в QGIS производился подсчет площадей зарастания гелофитами в гектарах.

### Результаты и обсуждение

В период наших исследований маловодными годами (уровень воды 147–175 см) были 2006, 2007, 2014, 2015 и 2016 гг. Самым низким уровнем характеризовался 2006 г. Многоводными (уровень воды 189–241 см) оказались 2005, 2008–2013, 2017 и 2018 гг. Средний многолетний уровень за период с 1956 по 2018 г. составил 191 см (данные Псковской ЦГМС по в/п о. Залита).

Регрессионный анализ зависимости видового богатства от среднегодовых значений уровня воды в озере показал, что количество прибрежно-водных растений на станциях мониторинга достоверно увеличивается со снижением уровня воды (рис. 3). В маловодные годы уменьшается глубина распространения основных эдификаторов гелофитной растительности – тростника южного и камыша озерного. В акватории озера безусловное преобладание получала погруженная водная растительность.

По результатам классификации спутниковых снимков разных лет нами высчитаны значения прироста (в га) воздушно-водной растительности литоральной части Псковского озера (табл.). Наименьшая доля прироста (0,04 % от площади озера) отмечена в маловодном 2007 г., когда заросли гелофитов почти полностью располагались на суше. Также следует отметить, что конфигурация береговой линии 2007 г. из всех принимавших участие в анализе зарастания гелофитами в наибольшей степени близка к усредненной береговой линии, полученной в ходе обобщения результатов дешифрирования космических снимков (рис. 2). Наибольший прирост гелофитов (0,9 %) – в 2011 г.

Среди гелофитов ведущая роль в зарастании литоральной зоны Псковского озера, так же как и большинства крупных озер Северо-Запада (Ладожское, Онежское, Белое, Воже, Лача), принадлежит сообществам тростника южного [Распопов, 1985; Русанов, 2011].

Для оценки состояния зарослей тростника, как основного эдификатора литоральной зоны

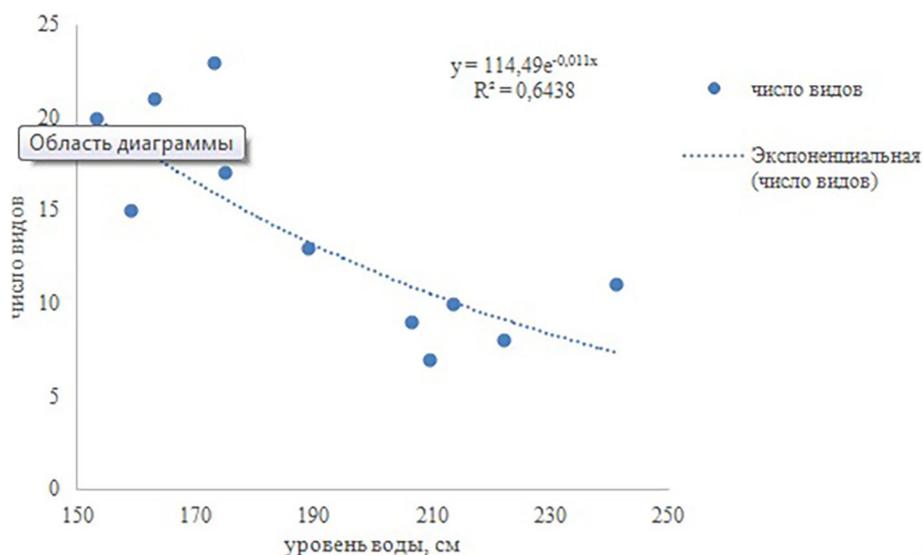


Рис. 3. Зависимость количества прибрежно-водных растений от уровня воды в Псковском озере на примере станции Зимний Борок (1989–2019 гг.)

Fig. 3. The dependence of the number of coastal-aquatic plants at the stations Zimnij Borok on the water level in Lake Pskov (1989–2019)

Прирост гелофитов (га) от средней границы Псковского озера (1989–2019)

Increase in gelophytes (hectare) from the middle border of Lake Pskov (1989–2019)

Год Year	Прирост от среднего, га Increase from the average, ha	Доля от площади водоема, % Share of the pond area, %
1989	52,8	0,07
2005	288	0,4
2007	26,56	0,04
2011	641,9	0,9
2019	238,9	0,3

Псковского озера, измерялись основные структурные показатели: длина, диаметр побега, плотность травостоя, биомасса. Многочисленными исследованиями доказано [Кроткевич, 1970; Эйнон, 1992; Lenssen et al., 1999; Судницyna, Козырева (Михайлова), 2005; Фрейберг, 2006], что эти показатели зависят от климатических условий, особенностей местообитания (характер грунта и динамичность водной массы), а также от количества биогенных элементов в воде. По нашим наблюдениям, высота и диаметр растений прибрежных зарослей зависят от типа почв и длительности затопления.

Как отмечают Л. П. Федорова и С. В. Сентищева [2014], в настоящее время многие исследователи, изучающие процессы зарастания водохранилищ с переменным уровнем воды, считают, что увеличиваются не площади зарастания, но фитомасса и продукция ассоциаций, а также их плотность. Регулярное определение плотно-

сти растительных сообществ Псковского озера, особенно тростника и камыша, проводилось только в последние годы (с 2005 г). В. В. Иванов [1949] отмечает, что плотность тростника в этот период варьирует от 25 до 104 экз./м<sup>2</sup> (в среднем 65 экз./м<sup>2</sup>). В 1989 г. среднее значение плотности тростника составило 91 экз./м<sup>2</sup>. По нашим наблюдениям, плотность зарослей тростника и высота стеблей значительно изменяется по ширине зарослей, станциям и годам. В период с 2007 по 2019 г. средний показатель плотности стеблей равен 105 экз./м<sup>2</sup>. В последние годы на станциях мониторинга отмечается увеличение плотности стеблей тростника (120–144 экз./м<sup>2</sup>) из-за наличия прошлогодних сухих стеблей. На некоторых пробных площадках доля сухих побегов на 1 м<sup>2</sup> составляла от 16 до 40 % от общего числа побегов. Скорее всего, этот факт объясняется отсутствием ледохода, во время которого прошлогодние сухие растения срезаются выбрасываемыми на берег льдинами.

Анализируя литературные данные и результаты собственных наблюдений, можно сделать вывод о явной тенденции к увеличению показателей надземной биомассы тростника за исследуемый период (рис. 4).

В то же время показатели биомассы тростника изменяются в зависимости от ежегодных колебаний уровня воды в водоеме. Известно, что подъем уровня сопровождается значительным снижением фитомассы и плотности зарослей тростника [Schmieder et al., 2002]. Чаще всего, повышение уровня воды в Псковском озере сопровождается уменьшением значений

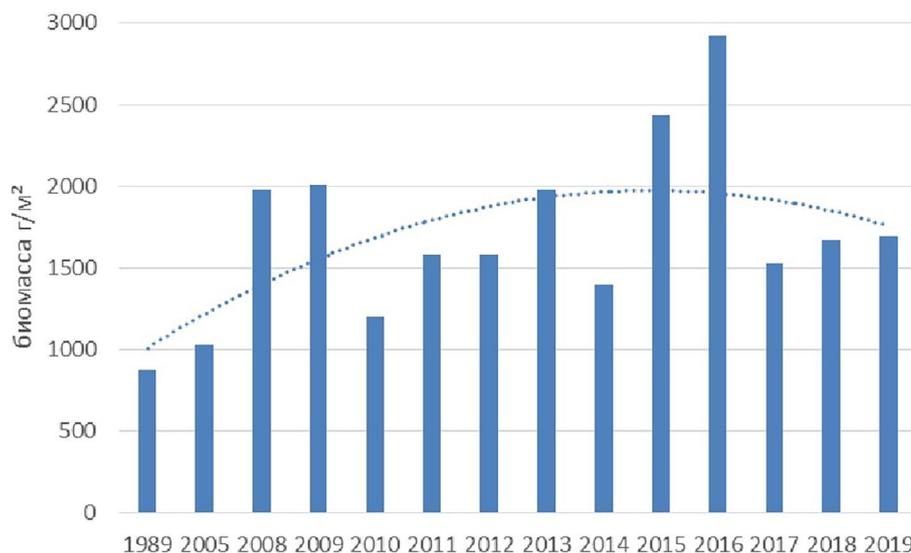


Рис. 4. Средние значения надземной биомассы (в абсолютно сухом виде) тростника южной литоральной зоны Псковского озера (1989–2019 гг.)

Fig. 4. Average values of aboveground biomass (oven-dry mass) of reeds of the southern littoral zone of Lake Pskov (1989–2019)

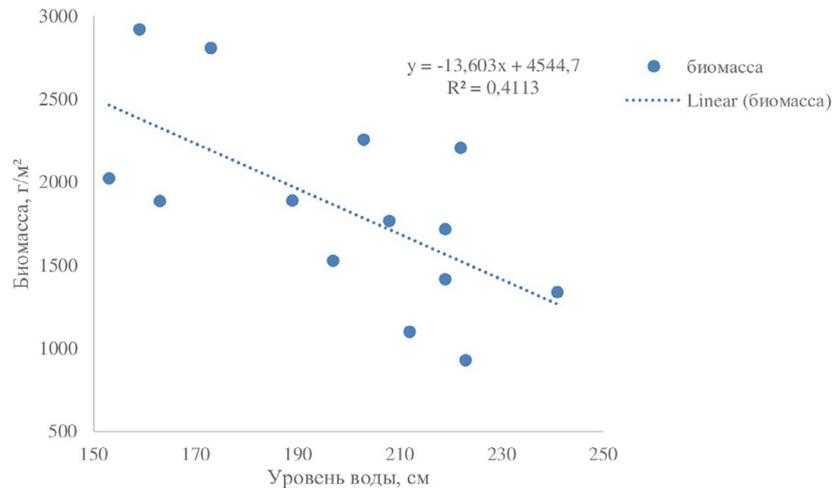


Рис. 5. Зависимость средних значений надземной биомассы (в абсолютно сухом виде) тростника от среднего уровня воды в Псковском озере (1989–2018 гг.)

Fig. 5. The dependence of the average values of aboveground biomass (oven-dry mass) of reeds on the average water level in Lake Pskov (1989–2018)

надземной биомассы. В маловодные годы наблюдается некоторое увеличение этого показателя (рис. 5). Подобные результаты получены исследователями литоральной зоны Ладожского озера [Русанов, 2011].

По данным авторов, изучающих водоемы с переменным режимом уровня, при повышении уровня воды возрастает биогенная нагрузка на водохранилища, увеличивается вынос минеральных элементов с водосборной площади [Шилькрот, 1979]. Дополнительным источником биогенных веществ в многоводные годы становятся залитые участки осушной зоны с остатками обильных зарослей высшей водной растительности, образовавшихся в предшествующие вегетационные сезоны. Многие из поступающих с поверхностным стоком биогенов

мигрируют вместе с взвесью, которая попадает в водохранилище и быстро оседает [Зиминова, 1967]. В маловодные годы в связи с повышением температуры на мелководных участках идут интенсивные процессы разложения осевшей в грунтах органики, которая активно поглощается гелофитами, что ведет, в свою очередь, к увеличению величины их биомассы.

Анализ данных, полученных с помощью спутниковых снимков за период с 1989 по 2019 г., позволяет сделать вывод о том, что процесс зарастания литоральной зоны Псковского озера гелофитной растительностью носит флуктуирующий характер с выраженной положительной трендовой составляющей площади прироста гелофитов относительно конфигурации средней береговой линии озера (табл., рис. 6).

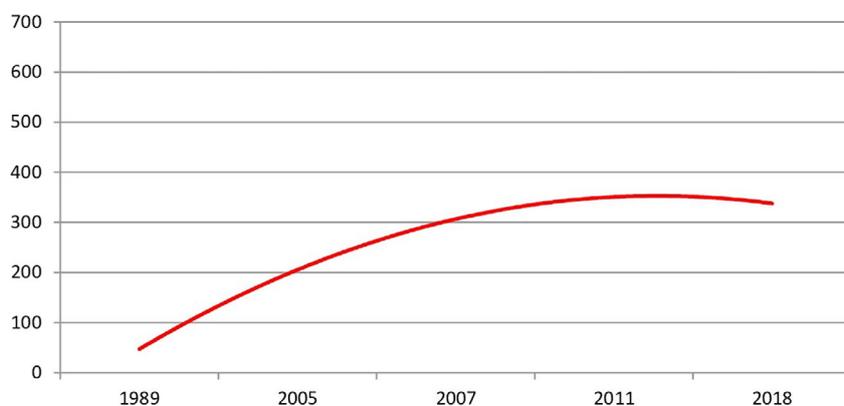


Рис. 6. Тренд многолетней динамики изменения площади зарастания (в га) литоральной зоны Псковского озера (1989–2018 гг.)

Fig. 6. Trend of the long-term dynamics of overgrowth area change (in ha) in the littoral zone of Lake Pskov (1989–2018)

Аналогичные результаты отмечают и другие авторы, проводившие исследования процессов зарастания водоемов с использованием спутниковых снимков [Филоненко, Комарова, 2015; Peterson, Liira, 2016].

## Заключение

Общий характер и динамика зарастания Псковского озера во многом определяются мелководностью, высоким трофическим уровнем, климатическими флуктуациями, цикличностью гидрологического режима.

В годы с низким уровнем воды, с увеличением зоны литорали растет площадь, занимаемая высшей водной растительностью, увеличивается количество прибрежно-водных растений.

В зарастании берегов Псковского озера ведущая роль принадлежит самому мощному эдификатору среди гелофитов – тростнику южному. Основные структурные показатели тростника (высота побега, плотность травостоя, биомасса) варьируют по ширине зарослей, станциям и годам и находятся в зависимости от ежегодных колебаний уровня воды в водоеме.

Анализ данных, полученных с помощью спутниковых снимков за период с 1989 по 2019 г., выявил положительную трендовую составляющую площади прироста гелофитов в литоральной зоне водоема.

Использование снимков ДЗЗ позволяет получить широкую площадь обзора и хорошие возможности дешифрирования за счет комбинаций спектральных каналов, что дает возможность подобрать наиболее контрастное отображение интересующих растительных сообществ [Филоненко, Комарова, 2015; Михайлова, Михалап, 2019].

Полученные результаты подтверждают возможность использования данных ДЗЗ как надежного инструмента для оценки состояния и степени зарастания гелофитной растительностью литоральной зоны Псковского озера, который в совокупности с полевой верификацией позволяет выявить достаточно полную картину процессов зарастания литорали внутренних водоемов.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда, грант № 20-64-46018.

## Литература

Белавская А. П. К методике изучения водной растительности // Бот. журн. 1979. Т. 64, № 1. С. 32–41.

Гигевич Г. С. Биоиндикаторная роль макрофитов при антропогенном воздействии (на примере озер Белоруссии) // Антропогенные изменения экосистем малых озер (причины, последствия, возможность управления). Кн. 2. СПб.: Гидрометеиздат, 1991. С. 204–206.

Гигевич Г. С., Власов Б. П., Вынаев Г. В. Ресурсы высших водных растений озер Беларуси // Вестник Белорусского государственного университета. Сер. 2. Химия. Биология. География. 1999. № 3. С. 66–71.

Денисова И. А., Драбкова В. Г., Прыткова М. Я. Проблема зарастания озер, причины и экологические последствия / Ред. В. Г. Драбкова, М. Я. Прыткова. СПб.: Наука, 1999. С. 5–11.

Драбкова В. Г., Сорокин И. Н. Озеро и его водосбор – единая природная система. Л.: Наука, 1979. 196 с.

Зиминова Н. А. Факторы, определяющие количество и состав взвешенных веществ в Рыбинском водохранилище // Круговорот вещества и энергии в озерных водоемах. М.: Наука, 1967. С. 124–131.

Иванов В. В. Закономерности распределения и практическое использование высшей водной растительности Псковского озера: Дис. ... канд. биол. наук. Л., 1949. 210 с.

Иванов В. В. К вопросу о зарастании озер Псковской области // Малые озера Псковской и смежных областей и их использование: Тезисы межвузов. науч. конф. Псков, 1966. С. 43–45.

Капутерко С. А., Соколов А. А., Филатова Т. Н. Состояние и перспективы исследований экосистемы Чудско-Псковского озера // Проблемы исследования крупных озер СССР / Ред. О. А. Алекин. Л.: Наука, 1985. С. 155–159.

Катанская В. М. Высшая водная растительность континентальных водоемов СССР. Л.: Наука, 1981. 187 с.

Костюченко В. П., Семенова А. А., Хлобастина Г. А. Гидролого-гидрохимическая характеристика Псковско-Чудского водоема // Изв. ГосНИОРХ. 1974. Т. 83. С. 5–15.

Кроткевич П. Г. Биолого-экологические свойства и народно-хозяйственное использование тростника обыкновенного – *Phragmites communis* Trin.: Автореф. дис. ... д-ра биол. наук. Киев, 1970. 71 с.

Куллус Л. П., Мерила Л. А. Данные по изученности, гидрометеорологическому и гидрохимическому режимам Псковско-Чудского озера // Гидробиология и рыбное хоз-во Псковско-Чудского озера. Таллин: Валгус, 1966. С. 9–34.

Милюс А., Халдна М. Гидрохимия // Псковско-Чудское озеро. Тарту: Eesti Loodusfoto, 2012. С. 159–183.

Михайлова К. Б., Михалап С. Г. Многолетняя динамика площади зарастания гелофитной растительностью Псковского озера // Трансформация экосистем. 2019. Т. 2, № 1. С. 86–93. doi: 10.23859/estr-200404

Монюшко В. А. К распределению растительности в Гдовском уезде // Труды Лен. общества изучения местного края. Т. 1. Л., 1927. С. 41–54.

Мяэметс А. А. Высшая водная растительность // Чудско-Псковское озеро. Л.: Гидрометеиздат, 1983. С. 125–126.

Недоспасова Г. В. Высшая водная растительность Псковско-Чудского водоема // Известия ГосНИОРХа. 1974. Т. 83. С. 26–32.

Ниценко А. А. Краткий курс болотоведения. М.: Высшая школа, 1967. 148 с.

Папченков В. Г. Растительный покров водоемов и водотоков Среднего Поволжья. Ярославль: ЦМП МУБиНТ, 2001. 200 с.

Папченков В. Г., Щербаков А. В., Лапиров А. Г. Основные гидробиологические понятия и сопутствующие им термины // Гидробиология: методология, методы: Матер. Школы по гидробиол. Рыбинск: Рыбинский Дом печати, 2003. С. 27–38.

Распопов И. М. Высшая водная растительность больших озер Северо-Запада СССР. Л.: Наука, 1985. 200 с.

Русанов А. Г. Пространственное распределение высшей водной растительности Ладожского озера в зависимости от природных и антропогенных факторов // Литоральная зона Ладожского озера / Ред. Е. А. Курашов. СПб.: Нестор-История, 2011. С. 68–101.

Садчиков А. П., Кудряшов М. А. Экология прибрежно-водной растительности (учебное пособие для студентов вузов). М.: НИА-Природа; РЭФИА, 2004. 220 с.

Синкявичене З. В. Характеристика растительности средних и малых рек Литвы: Автореф. дис. ... канд. биол. наук. Вильнюс, 1992. 28 с.

Судницына Д. Н. Особенности зарастания Псковско-Чудского озера // Экологические проблемы Северо-Запада. Псков, 1990. С. 32–35.

Судницына Д. Н., Ганго А., Осипова Н. Особенности зарастания Псковско-Чудского озера // Экологические проблемы Северо-Запада России: Крат. тезисы конф. Псков, 1990. С. 32–35.

Судницына Д. Н., Козырева (Михайлова) К. Б. Биоэкологическая и геоботаническая характеристика тростника обыкновенного Псковско-Чудского озера // Запад и ближнее зарубежье: устойчивость социально-культурных и эколого-хозяйственных систем. Псков, 2005. С. 148–151.

Судницына Д. Н., Михайлова К. Б. Влияние колебаний уровня воды Псковско-Чудского озера на структуру флоры Талабских островов // Вестник Псковского государственного университета. Сер. Естественные и физико-математические науки. 2016. Вып. 9. С. 42–50.

Тувикене Х. М. О высшей водной растительности Чудско-Псковского озера // Гидробиология и рыбное хозяйство Псковско-Чудского озера. Таллин, 1966. С. 75–81.

Федорова Л. П., Сентищева С. В. Перспективы использования белого амура в мелиоративных целях в зарастающих заливах Иваньковского водохранилища // Рыбное хозяйство. 2014. Спецвыпуск. С. 37–41.

Филоненко И. В., Комарова А. С. Многолетняя динамика площади зарастания прибрежно-водной растительностью оз. Воже // Принципы экологии. 2015. Т. 4, № 4. С. 63–72.

Фрейберг Л. Характеристика тростника в Эстонской части Чудско-Псковского озера // Гидробиоло-

ника 2005: Матер. VI Всерос. шк.-конф. по водным макрофитам. Рыбинск, 2006. С. 367–368.

Чавычалова Н. И., Кушнаренко А. И. Влияние зарастаемости нерестилищ макрофитами на эффективность естественного воспроизводства северокаспийской воблы // Юг России: экология и развитие. 2008. № 4. С. 115–121.

Чудско-Псковское озеро (Гидрометеорологический режим озер и водохранилищ СССР) / Под ред. А. А. Соколова. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 162 с.

Шевкунова Э. И., Мещерская А. В., Яни А. Э. Прибалтика – особый район климатических изменений // Социальные и экологические проблемы Балтийского региона: Матер. обществ.-науч. конф. (Псков, ноябрь 2000 г.). Ч. 2. Псков: ПГПИ, 2001. С. 9–21.

Шилькрот Г. С. Типологические изменения режима озер в условиях культурных ландшафтов. М.: Наука, 1979. 168 с.

Эйнор Л. О. Макрофиты в экологии водоема. М.: Изд-во ИВП РАН, 1992. 256 с.

Dudgeon D., Arthington A. H., Gessner M. O., Kawabata Z.-I., Knowler D. J., Lévêque C., Naiman R. J., Prieur-Richard A.-H., Soto D., Stiassny M. L. J., Sullivan C. A. Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges // Biol. Rev. 2006. Vol. 81, iss. 2. P. 163–182. doi: 10.1017/S1464793105006950

Engelhardt K. A. M., Ritchie M. E. Effects of macrophyte species richness on wetland ecosystem functioning and services // Nature. 2001. Vol. 411. P. 687–689.

Hilt S., Brothers S., Jeppesen E., Veraart A. J., Kosten S. Translating regime shifts in shallow lakes into changes in ecosystem functions and services // BioSci. 2017. Vol. 67, iss. 10. P. 928–936.

Hudon C., Gagnon P., Jean M. Hydrological factors controlling the spread of common reed (*Phragmites australis*) in the St. Lawrence River (Québec, Canada) // Écosci. 2005. Vol. 12. doi: 10.2980/i1195-6860-12-3-347.1

Irigoien X., Harris R. P., Head R. N., Harbour D. North Atlantic Oscillation and spring bloom phytoplankton compositions in the English Channel // J. Plankton Res. 2000. Vol. 22, iss. 12. P. 2367–2371.

Jaagus J. Uusi andmeid Eesti kliimast // Uurimusi Eesti kliimast: Publicationes Instituti Geographici Universitatis Tartuensis. 2003. P. 78–101.

Jeppesen E., Mehner T., Winfield I. J., Kangur K., Sarvala J., Gerdeaux D., Rask M., Malmquist H. J., Holmgren K., Volta P., Romo S., Eckmann R., Sandström A., Blanco S., Kangur A., Stabo H. R., Tarvainen M., Ventelä A.-M., Søndergaard M., Lauridsen T. L., Meerhoff M. Impacts of climate warming on the long-term dynamics of key fish species in 24 European lakes // Hydrobiologia. 2012. Vol. 694. P. 1–39. doi: 10.1007/s10750-012-1182-1

Kangur K., Möls T. Changes in spatial distribution of phosphorus and nitrogen in large north-temperate lowland Lake Peipsi (Estonia / Russia) // Hydrobiologia. 2008. Vol. 599. P. 31–39. doi: 10.1007/s10750-007-9204-0

Laugaste R., Lessok K. Planctonic algae and epiphyton of the littoral in Lake Peipsi, Estonia // Limnologica. 2004. Vol. 34. P. 90–97. doi: 10.1016/S0075-9511(04)80026-4

Lenssen J. P. M., Menting F. B. J., van der Putten W. H., Blom C. W. P. M. Effects of sediment type and water level on the biomass production of wetland plant species // *Aquat. Bot.* 1999. Vol. 64. P. 151–165.

Lippmaa T. Lobotka ja Petseri vallarühmade taimkate Eesti. Maateaduslik, tulunduslik ja ajalooline kirjeldus. II. Setumaa. Tartu, 1928. P. 247–254, 294–297.

Nöges T., Nöges P., Jolma A., Kaitaranta J. Impacts of climate change on physical characteristics of lakes in Europe. Luxembourg: OOEPEC, 2009. doi: 10.2788/41235

Palmik K., Mäemets H., Haldna M., Kangur K. A comparative study of macrophyte species richness in differently managed shore stretches of Lake Peipsi // *Limnologia*. 2013. Vol. 43, iss. 4. P. 245–253. doi: 10.1016/j.limno.2012.11.005

Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A. S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes // *Nature*. 2016. Vol. 540. P. 418–422. doi: 10.1038/nature20584

Peterson U., Liira J. Eesti ja Euroopa järvede kalda-veetaimestiku, põhiliselt rannarostike dünaamika Landsati piltide aegreas / Eds. U. Peterson, T. Lillemaa. Eesti kaugseire. Tartu Observatoorium, Tõravere, Estonia, 2016. P. 119–135.

## References

Belavskaya A. P. K metodike izucheniya vodnoi rastitel'nosti [To the methodology of studying aquatic vegetation]. *Bot. zhurn.* [Bot. J.] 1979. Vol. 64, no. 1. P. 32–41.

Chavychalova N. I., Kushnarenko A. I. Vliyanie zarastanosti nerestilishch makrofitami na effektivnost' estestvennogo vosproizvodstva severokaspiiskoi vobly [The impact of spawning grounds overgrowth with macrophytes on the effectiveness of natural reproduction of the North Caspian Wobble]. *Yug Rossii: ekol. i razvitie* [South of Russia: ecol. and development]. 2008. No. 4. P. 115–121.

Chudsko-Pskovskoe ozero (Gidrometeorologicheskii rezhim ozer i vodokhranilishch SSSR) [Lake Chudsko-Pskovskoe (Hydrometeorological regime of lakes and reservoirs of the USSR)]. Leningrad: Gidrometeorizdat, 1983. 162 p.

Denisova I. A., Drabkova V. G., Prytkova M. Ya. Problema zarastaniya ozer, prichiny i ekologicheskie posledstviya [The problem of overgrowing lakes, causes and environmental consequences]. St. Petersburg: Nauka, 1999. P. 5–11.

Drabkova V. G., Sorokin I. N. Ozero i ego vodosbor – edinaya prirodnyaya sistema [The lake and its catchment – a single natural system]. Leningrad: Nauka, 1979. 196 p.

Einor L. O. Makrofity v ekologii vodoema [Macrophytes in the ecology of the reservoir]. Moscow: Izd-vo IVP RAN, 1992. 256 p.

Fedorova L. P., Sentishcheva S. V. Perspektivy ispol'zovaniya belogo amura v meliorativnykh tselyakh v zarastayushchikh zalivakh Ivan'kovskogo vodokhranilishcha [Prospects for the use of the white amur for reclamation purposes in the overgrowing bays of the Ivan'kovo reservoir]. *Rybnoe khozyaistvo* [Fisheries]. 2014. Special issue. P. 37–41.

Pickens A. H., Hansen M. C., Hancher M., Stehman S. V., Tyukavina A., Potapov P., Marroquin B., She-rani Z. Mapping and sampling to characterize global inland water dynamics from 1999 to 2018 with full Landsat time-series // *Remote Sens. Environ.* 2020. Vol. 243. doi: 10.1016/j.rse.2020.111792

Schmieder K., Dienst M., Ostendorp W. Effects of the extreme flood in 1999 on the spatial dynamics and stand structure of the reed belts in Lake Constance // *Limnologia*. 2002. Vol. 32. P. 131–146.

Smith B., Aasa A., Ahas R., Blenckner T., Callaghan T., de Chazal J., Humborg C., Jönsson A. M., Kellomäki S., Kull A., Lehikoinen E., Mander Ü., Nöges P., Nöges T., Rounsevell M., Sofiev M., Tryjanowski P., Wolf A. Climate-related change in terrestrial and freshwater ecosystems // *Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin* / Eds. H.-J. Bolle, M. Menenti, I. Rasool. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. P. 221–308.

Starast H., Lindpere A., Milius A. Hydrochemical regime of three parts of lake Peipsi during vegetation period // *Biol. Ecol.* 1999. Vol. 48, no. 3. P. 199–215.

Поступила в редакцию 13.01.2021

Filonenko I. V., Komarova A. S. Mnogoletnyaya dinamika ploshchadi zarastaniya pribrezhno-vodnoi rastitel'nost'yu oz. Vozhe [Long-term dynamics of the area of overgrown with coastal-aquatic vegetation of Lake Vozhe]. *Printsipy ekol.* [Principles of Ecol.]. 2015. Vol. 4, no. 4. P. 63–72.

Freiberg L. Kharakteristika trostnika v Estonskoi chasti Chudsko-Pskovskogo ozera [Characteristics of reeds in the Estonian part of Lake Peipsi-Pskov]. *Gidrobotanika 2005: Mat. VI Vseros. shk.-konf. po vodnym makrofitam* [Hydrobotany 2005: Proceed. VI All-Russ. school – conf. on water macrophytes]. Rybinsk, 2006. P. 367–368.

Gigevich G. S. Bioindikatornaya rol' makrofitov pri antropogennom vozdeistvii (na primere ozer Belarusii) [Bioindicator role of the macrophytes under anthropogenic impact (on the example of the lakes of Belarus)]. *Antropogennye izmeneniya ekosistem malykh ozer (prichiny, posledstviya, vozmozhnost' upravleniya): Mater. Vsesoyuzn. konf.* [Anthropogenic changes in ecosystems of small lakes (causes, consequences, and management opportunity): Proceed. All-Union conf.]. Vol. 2. St. Petersburg: Gidrometeorizdat, 1991. P. 204–206.

Gigevich G. S., Vlasov B. P., Vynaev G. V. Resursy vysshikh vodnykh rastenii ozer Belarusi [Resources of higher aquatic plants of lakes in Belarus]. *Vestnik Belorusskogo gos. univ. Ser. 2. Khim. Biol. Geografiya* [Bull. Belarusian St. Univ. Ser. 2. Chem. Biol. Geography]. 1999. No. 3. P. 66–71.

Ivanov V. V. Zakonomernosti raspredeleniya i prakticheskoe ispol'zovanie vysshei vodnoi rastitel'nosti Pskovskogo ozera [Patterns of distribution and practical use of higher aquatic vegetation of Lake Pskov]: DSc (Cand. of Biol.) thesis. Leningrad, 1949. 210 p.

Ivanov V. V. K voprosu o zarastanii ozer Pskovskoi oblasti [On the issue of overgrowing of lakes in the Pskov Region]. *Malye ozera Pskovskoi i smezhnykh oblastei i ikh ispol'zovanie*: Tezisy mezhvuzov. nauch. konf. [Small lakes of the Pskov and related regions and their use: Abs. interuniv. sci. conf.]. Pskov, 1966. P. 43–45.

Kaputerko S. A., Sokolov A. A., Filatova T. N. So-stoyanie i perspektivy issledovaniya ekosistemy Chudsko-Pskovskogo ozera [The state and prospects of research on the ecosystem of Lake Peipsi-Pskov]. *Problemy issled. krupnykh ozer SSSR* [Research probl. of large lakes in the USSR]. Leningrad: Nauka, 1985. P. 155–159.

Katanskaya V. M. Vysshaya vodnaya rastitel'nost' kontinental'nykh vodoemov SSSR [Higher aquatic vegetation of the continental reservoirs of the USSR]. Leningrad: Nauka, 1981. 187 p.

Kostyuchenko V. P., Semenova A. A., Khlobastina G. A. Gidrologo-gidrokhimicheskaya kharakteristika Pskovsko-Chudskogo vodoema [Hydrological and hydrochemical characteristics of the Pskov-Peipsi reservoir]. *Izv. GosNIORKh* [Proceed. National Res. Inst. of Lake and River Fisheries]. 1974. Vol. 83. P. 5–15.

Krotkevich P. G. Biologo-ekologicheskie svoystva i narodno-khozyaistvennoe ispol'zovanie trostnika obyknovennogo – *Phragmites communis* Trin. [Biological and ecological properties and national economic use of common reed]: Summary of DSc (Dr. of Biol.) thesis. Kiev, 1970. 71 p.

Kullus L. P., Merila L. A. Dannye po izuchennosti, gidrometeorologicheskomu i gidrokhimicheskomu rezhimam Pskovsko-Chudskogo ozera [Data on the level of knowledge, hydrometeorological and hydrochemical regimes of the Pskov-Peipsi lake]. *Gidrobiol. i rybnoe khoz-vo Pskovsko-Chudskogo ozera* [Hydrobiol. and fish industry of the Pskov-Peipsi lake]. Tallin: Valgus, 1966. P. 9–34.

Milius A., Khaldna M. Gidrokimiya [Hydrochemistry]. *Pskovsko-Chudskoe ozero* [Lake Pskov-Peipsi]. Tartu: Eesti Loodusfoto, 2012. P. 159–183.

Mikhailova K. B., Mikhailap S. G. Mnogoletnyaya dinamika ploshchadi zarastaniya gelofitnoi rastitel'nosti v Pskovskogo ozera [Long-term dynamics of the area of overgrowth with gelophytic vegetation of Lake Pskov]. *Transformatsiya ekosistem* [Transformation of ecosystems]. 2019. Vol. 2, no. 1. P. 86–93. doi: 10.23859/estr-200404

Monyushko V. A. K raspredeleniyu rastitel'nosti v Gdovskom uезде [To the distribution of vegetation in the Gdovskiy District of the Leningrad Province]. *Trudy Len. obshchestva izucheniya mestnogo kraya* [Works of the Leningrad Society for the Local Territory Study]. Vol. 1. Leningrad, 1927. P. 41–54.

Myaemets A. A. Vysshaya vodnaya rastitel'nost' [Higher water vegetation]. *Chudsko-Pskovskoe ozero* [Lake Peipsi-Pskov]. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1983. P. 125–126.

Nedospasova G. V. Vysshaya vodnaya rastitel'nost' Pskovsko-Chudskogo vodoema [Highest water vegetation of the Pskov-Peipsi reservoir]. *Izv. GosNIORKh* [Proceed. National Res. Inst. of Lake and River Fisheries]. 1974. Vol. 83. P. 26–32.

Nitsenko A. A. Kratkii kurs bolotovedeniya [Short Course of Marsh Studies]. Moscow: Vyssh. shk., 1967. 148 p.

Papchenkov V. G. Rastitel'nyi pokrov vodoemov i vodotokov Srednego Povolzh'ya [Plant cover of reservoirs and watercourses of the Middle Volga region]. Yaroslavl': TsMP MUBiNT, 2001. 200 p.

Papchenkov V. G., Shcherbakov A. V., Lapirova A. G. Osnovnye gidrobiologicheskie ponyatiya i sopushtvuyushchie im terminy [The main hydrobiological concepts and the terms accompanying them]. *Gidrobotanika: metodologiya, metody*: Mat. Shkoly po gidrobot. [Hydrobotany: methodology, methods: Proceed. hydrobot. schools]. Rybinsk: Rybinskii Dom pechati, 2003. P. 27–38.

Raspopov I. M. Vysshaya vodnaya rastitel'nost' bol'shikh ozer Severo-Zapada SSSR [The highest water vegetation of large lakes of the North-West of the USSR]. Leningrad: Nauka, 1985. 200 p.

Rusanov A. G. Prostranstvennoe raspredelenie vysshei vodnoi rastitel'nosti Ladozhskogo ozera v zavisimosti ot prirodnykh i antropogennykh faktorov [Spatial distribution of the highest aquatic vegetation of Lake Ladoga depending on natural and anthropogenic factors]. *Litoral'naya zona Ladozhskogo ozera* [Littoral zone of Lake Ladoga]. St. Petersburg: Nestor-Istoriya, 2011. P. 68–101.

Sadchikov A. P., Kudryashov M. A. Ekologiya pribrezhno-vodnoi rastitel'nosti (uchebnoe posobie dlya studentov vuzov) [Ecology of coastal-aquatic vegetation (a university textbook)]. Moscow: NIA-Priroda, REFIA, 2004. 220 p.

Shevkunova E. I., Meshcherskaya A. V., Yaani A. E. Pribaltika – osobyi raion klimaticheskikh izmenenii [Baltic states – a special area of climate change]. *Sotsial'nye i ekol. probl. Baltiiskogo regiona*: Mater. obshch.-nauch. konf. (Pskov, noyabr' 2000 g.) [Social and environ. probl. of the Baltic region: Proceed. socio-sci. conf. (Pskov, Nov. 2000)]. Part. 2. Stat'i. Pskov: PGPI, 2001. P. 9–21.

Shil'krot G. S. Tipologicheskie izmeneniya rezhima ozer v usloviyakh kul'turnykh landshaftov [Typological changes in the regime of lakes in conditions of cultural landscapes]. Moscow: Nauka, 1979. 168 p.

Sinkyavichene Z. V. Kharakteristika rastitel'nosti srednykh i malykh rek Litvy [Characteristics of the vegetation of the medium and small rivers of Lithuania]: Summary of PhD (Cand. of Biol.) thesis. Vil'nyus, 1992. 28 p.

Sudnitsyna D. N. Osobennosti zarastaniya Pskovsko-Chudskogo ozera [Features of overgrowing of Lake Pskov-Peipsi]. *Ekol. probl. Severo-Zapada* [Environ. probl. of the North-West]. Pskov, 1990. P. 32–35.

Sudnitsyna D. N., Gango A., Osipova N. Osobennosti zarastaniya Pskovsko-Chudskogo ozera [Features of overgrowing of Lake Pskov-Peipsi]. *Ekol. probl. Severo-Zapada Rossii*: Krat. tez. konf. [Environ. probl. of North-West Russia: Abs.]. Pskov, 1990. P. 32–35.

Sudnitsyna D. N., Kozyreva (Mikhailova) K. B. Bioekologicheskaya i geobotanicheskaya kharakteristika trostnika obyknovennogo Pskovsko-Chudskogo ozera [Bioecological and geobotanical description of the reed of ordinary Lake Pskov-Peipsi]. *Zapad i blizhnee zarubezh'e: ustoychivost' sotsial'no-kul'turnykh i ekologo-khozyaistvennykh sistem* [West and near abroad: Stability of socio-cultural and ecological-economic systems]. Pskov, 2005. P. 148–151.

Sudnitsyna D. N., Mikhailova K. B. Vliyanie kolebanii urovnya vody Pskovsko-Chudskogo ozera na strukturu

- flory Talabskikh ostrovov [The influence of fluctuations in the water level of Lake Pskov-Peipsi on the structure of the flora of the Talab Islands]. *Vestnik Pskovskogo gos. univ. Ser. Estestv. i fiziko-mat. nauki* [Bull. Pskov St. Univ. Ser. Nat. and Physical and Math. Sciences]. 2016. Iss. 9. P. 42–50.
- Tuvikene H. M. O vysshei vodnoi rastitel'nosti Chudsko-Pskovskogo ozera [On the highest aquatic vegetation of Lake Peipsi-Pskov]. *Gidrobiol. i rybnoe khozyaistvo Pskovsko-Chudskogo ozera* [Hydrobiol. and fisheries of Lake Pskov-Peipsi]. Tallin, 1966. P. 75–81.
- Ziminova N. A. Faktory, opredelyayushchie kolichestvo i sostav vzveshennykh veshchestv v Rybinskom vodokhranilishche [Factors determining the amount and composition of suspended solids in the Rybinsk reservoir]. *Krugovorot veshchestva i energii v ozernykh vo-doemakh* [The cycle of substances and energy in lakes]. Moscow, 1967. P. 124–131.
- Dudgeon D., Arthington A. H., Gessner M. O., Kawabata Z.-I., Knowler D. J., Lévêque C., Naiman R. J., Prieur-Richard A.-H., Soto D., Stiassny M. L. J., Sullivan C. A. Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. *Biol. Rev.* 2006. Vol. 81, iss. 2. P. 163–182. doi: 10.1017/S1464793105006950
- Engelhardt K. A. M., Ritchie M. E. Effects of macrophyte species richness on wetland ecosystem functioning and services. *Nature*. 2001. Vol. 411. P. 687–689.
- Hilt S., Brothers S., Jeppesen E., Veraart A. J., Kosten S. Translating regime shifts in shallow lakes into changes in ecosystem functions and services. *BioSci*. 2017. Vol. 67, iss. 10. P. 928–936.
- Hudon C., Gagnon P., Jean M. Hydrological factors controlling the spread of common reed (*Phragmites australis*) in the St. Lawrence River (Québec, Canada). *Écosci.* 2005. Vol. 12. doi: 10.2980/i1195-6860-12-3-347.1
- Irigoien X., Harris R. P., Head R. N., Harbour D. North Atlantic Oscillation and spring bloom phytoplankton compositions in the English Channel. *J. Plankton Res.* 2000. Vol. 22, iss. 12. P. 2367–2371.
- Jaagus J. Uusi andmeid Eesti kliimast. *Uurimusi Eesti kliimast*: Publications Instituti Geographici Universitatis Tartuensis. 2003. P. 78–101.
- Jeppesen E., Mehner T., Winfield I. J., Kangur K., Sarvala J., Gerdeaux D., Rask M., Malmquist H. J., Holmgren K., Volta P., Romo S., Eckmann R., Sandström A., Blanco S., Kangur A., Stabo H. R., Tarvainen M., Ventelä A.-M., Søndergaard M., Lauridsen T. L., Meerhoff M. Impacts of climate warming on the long-term dynamics of key fish species in 24 European lakes. *Hydrobiologia*. 2012. Vol. 694. P. 1–39. doi: 10.1007/s10750-012-1182-1
- Kangur K., Möls T. Changes in spatial distribution of phosphorus and nitrogen in large north-temperate lowland Lake Peipsi (Estonia / Russia). *Hydrobiologia*. 2008. Vol. 599. P. 31–39. doi: 10.1007/s10750-007-9204-0
- Laugaste R., Lessok K. Planctonic algae and epiphyton of the littoral in Lake Peipsi, Estonia. *Limnologia*. 2004. Vol. 34. P. 90–97. doi: 10.1016/S0075-9511(04)80026-4
- Lenzen J. P. M., Menting F. B. J., van der Putten W. H., Blom C. W. P. M. Effects of sediment type and water level on biomass production of wetland plant species. *Aquat. Bot.* 1999. Vol. 64. P. 151–165.
- Lippmaa T. Lobotka ja Petseri vallaruumade taimkate Eesti. Maateaduslik, tulunduslik ja ajalooline kirjeldus. II. Setumaa. Tartu, 1928. P. 247–254, 294–297.
- Nöges T., Nöges P., Jolma A., Kaitaranta J. Impacts of climate change on physical characteristics of lakes in Europe. Luxembourg: OOEPEC, 2009. doi: 10.2788/41235
- Palmik K., Mäemets H., Haldna M., Kangur K. A comparative study of macrophyte species richness in differently managed shore stretches of Lake Peipsi. *Limnologia*. 2013. Vol. 43, iss. 4. P. 245–253. doi: 10.1016/j.limno.2012.11.005
- Pekel J.-F., Cottam A., Gorelick N., Belward A. S. High-resolution mapping of global surface water and its long-term changes. *Nature*. 2016. Vol. 540. P. 418–422. doi: 10.1038/nature20584
- Peterson U., Liira J. Eesti ja Euroopa järvede kalda-veetaimestiku, põhiliselt rannarostike dünaamika Landsati piltide aegreas. Eds. U. Peterson, T. Lillemaa. Eesti kaugeire. Tartu Observatoorium, Tõravere, Estonia, 2016. P. 119–135.
- Pickens A. H., Hansen M. C., Hancher M., Stehman S. V., Tyukavina A., Potapov P., Marroquin B., She-rani Z. Mapping and sampling to characterize global inland water dynamics from 1999 to 2018 with full Landsat time-series. *Remote Sens. Environ.* 2020. Vol. 243. doi: 10.1016/j.rse.2020.111792
- Schmieder K., Dienst M., Ostendorp W. Effects of the extreme flood in 1999 on the spatial dynamics and stand structure of the reed belts in Lake Constance. *Limnologia*. 2002. Vol. 32. P. 131–146.
- Smith B., Aasa A., Ahas R., Blenckner T., Callaghan T., de Chazal J., Humborg C., Jönsson A. M., Kellomäki S., Kull A., Lehtikainen E., Mander Ü., Nöges P., Nöges T., Rounsevell M., Sofiev M., Tryjanowski P., Wolf A. Climate-related change in terrestrial and freshwater ecosystems. *Assessment of Climate Change for the Baltic Sea Basin*. Eds. H.-J. Bolle, M. Menenti, I. Rasool. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008. P. 221–308.
- Starast H., Lindpere A., Milius A. Hydrochemical regime of three parts of lake Peipsi during vegetation period. *Biol. Ecol.* 1999. Vol. 48, no. 3. P. 199–215.

Received January 13, 2021

## **СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:**

### **Михайлова Кристина Борисовна**

специалист лаборатории экологии рыбохозяйственных водоемов  
Псковский филиал ФГБНУ «ВНИРО»  
ул. Максима Горького, 13, Псков, Россия, 180007  
эл. почта: kristina.pismo@yandex.ru

### **Михалап Сергей Геннадьевич**

и. о. руководителя  
Псковский филиал ФГБНУ «ВНИРО»  
ул. Максима Горького, 13, Псков, Россия, 180007

старший преподаватель  
Псковский государственный университет  
пл. Ленина, 2, Псков, Россия, 180000  
эл. почта: sgmikhailap@gmail.com

## **CONTRIBUTORS:**

### **Mikhailova, Kristina**

Pskov Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (VNIRO)  
13 Maksima Gor'kogo St., 180007 Pskov, Russia  
e-mail: kristina.pismo@yandex.ru

### **Mikhailap, Sergey**

Pskov Branch of the Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography (VNIRO)  
13 Maksima Gor'kogo St., 180007 Pskov, Russia

Pskov State University  
2 Lenin Sq., 180000 Pskov, Russia  
e-mail: sgmikhailap@gmail.com