Разнообразие растительного мира, 2026.
№ 3 (30). С. 117–153.

Diversity of plant world, 2026.
N 3 (30). P. 117–153.

ГЕОБОТАНИКА

УДК 528.94:528.9:004.032.26

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ТУНДРОВОЙ РАСТИТЕЛЬНОСТИ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ И ГЕНЕРАЛИЗАЦИЯ КРУПНОМАСШТАБНЫХ КАРТ

© И. А. Лавриненко
I. A. Lavrinenko

Tundra vegetation mapping using neural networks and large-scale map generalization

ФГБУН Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН
197022, Россия, г. Санкт-Петербург, ул. Профессора Попова, д. 2, литера Б. Тел.: +7 (911) 025-45-17, e-mail: lavrinenkoi@mail.ru

Аннотация. Картографирование растительности на эколого-флористической основе с применением данных дистанционного зондирования и методов глубокого обучения – актуальная задача, решение которой необходимо для повышения информативности и сопоставимости крупномасштабных геоботанических карт. Исследование выполнено с целью создания серии геоботанических карт разного масштаба на территорию ключевого участка на западе Большеземельской тундры в бассейне р. Северная (полоса северной лесотундры) с применением алгоритма нейронных сетей на основе массива полевых геоботанических описаний, спутниковых снимков сверхвысокого разрешения и аэрофотоснимков с БПЛА. Дешифрирование растительности проводилось методом обучения свёрточных нейронных сетей (CNN) с опорой на репрезентативную выборку эталонных наземных описаний и обучающих точек. В качестве классификационной основы для карт использованы синтаксоны эколого-флористической классификации; пространственная генерализация выполнена методом кросс-табуляции слоёв карт разного масштаба. Создана крупномасштабная геоботаническая карта (М 1 : 10 000), единицами легенды которой являются ассоциации, субассоциации и их комбинации. Показано, что CNN позволяют устойчиво распознавать значимые различия между сообществами разных синтаксонов, ранее выявляемые только при наземном картографировании. Проведена генерализация карты до масштабов 1 : 25 000 и 1 : 100 000, при этом для каждого укрупнённого выдела сохранены и количественно охарактеризованы синтаксономический состав и доля участия слагающих его единиц. Предложенный подход обеспечивает переход к единой системе типологии выделов крупномасштабных карт, что создает основу для корректного сравнения разномасштабных и территориально разобщённых геоботанических карт. Благодаря высокой диагностической роли синтаксонов такие карты являются основой для создания широкого спектра тематических карт, отражающих экологическое состояние территории и местообитаний, а также для организации мониторинга растительного покрова с последующей точной оценкой трансформации границ и синтаксономического состава выделов под влиянием климатических и антропогенных факторов. Нанесение на карту выделов, представленных сообществами синтаксонов, отсутствующих в действующей «Классификации растительности России», следует предварять их эффективной публикацией.

Ключевые слова: геоботаническое картографирование, свёрточные нейронные сети, CNN, эколого-флористическая классификация, синтаксономия, легенда карты, пространственная генерализация, кросс-табуляция, данные ДЗЗ, БПЛА.

Abstract. Vegetation mapping based on the ecological-floristic approach using remote sensing data and deep learning methods remains a pressing task, the solution of which is essential for improving the information content and comparability of large-scale geobotanical maps. The aim of this study was to create a series of geobotanical maps at different scales for a key site in the western part of the Bolshezemelskaya Tundra, within the Severnaya River basin (northern forest-tundra), by applying a convolutional neural network algorithm to an extensive dataset of field geobotanical relevés, very-high-resolution satellite imagery, and UAV aerial photographs. Vegetation classification was carried out using convolutional neural networks (CNN) trained on a representative sample of reference ground-based relevés and training points. Syntaxa of the ecological-floristic classification were adopted as the classification basis for the map legend; spatial generalization was performed using the cross-tabulation method. As a result, a large-scale geobotanical map (1 : 10 000) was produced, with associations, subassociations, and their combinations serving as legend units. It has been demonstrated that CNNs can robustly detect significant differ-

ences between communities of different syntaxa, which were previously only distinguishable through ground-based mapping. Map generalization to scales of 1 : 25 000 and 1 : 100 000 was carried out, while the syntaxonomic composition and the proportional contribution of constituent units were preserved and quantitatively characterized for each aggregated mapping unit. The proposed approach provides a transition toward a unified system of legend unit typology for large-scale maps, thus laying the foundation for a correct comparison of geobotanical maps of different scales and geographically distant areas. Owing to the high diagnostic value of syntaxa, such maps can serve as a basis for creating a wide range of thematic maps that reflect the ecological state of the territory and habitats, as well as for organizing vegetation cover monitoring, with subsequent precise assessment of boundary shifts and changes in the syntaxonomic composition of mapping units under the influence of climatic and anthropogenic factors. The delineation of mapping units represented by communities of syntaxa not yet listed in the current «Vegetation Classification of Russia» must be preceded by their effective publication.

Keywords: geobotanical mapping, convolutional neural networks, CNN, ecological-floristic classification, Braun-Blanquet approach, syntaxonomy, map legend, spatial generalization, cross-tabulation, remote sensing data, UAV imagery.

DOI: 10.22281/2686-9713-2026-3-117-153

Введение

Классификация растительности и подготовка крупномасштабных карт, отражающих актуальное состояние растительного покрова и природных местообитаний, имеют решающее значение для охраны и мониторинга окружающей среды, устойчивого землепользования и управления ресурсами. Особого внимания заслуживает растительный покров тундровой зоны, который, наряду с высокой уязвимостью, под воздействием климатических изменений и усиления антропогенного влияния в последние десятилетия подвергается масштабной трансформации. Удалённость и труднодоступность многих арктических территорий не позволяют в полной мере контролировать их состояние и проводить регулярные полевые работы даже на ключевых участках мониторинга. Наибольшую информативность в этом случае обеспечит сочетание полевых исследований на ключевых участках с широким использованием данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), включая спутниковую съёмку и снимки, полученные с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Даже разовое обследование территории и выполнение геоботанических описаний сообществ, максимально отражающих фитоценотическое разнообразие изучаемого района, будет служить надёжной основой для его картографирования и организации дистанционного мониторинга. На наш взгляд, принципиально важным в данном случае будет подготовка крупномасштабных карт растительности, наиболее полно и достоверно отражающих синтаксономическое разнообразие территории и его распределение в пределах участка. Учитывая мелкоконтурность и мозаичность растительного покрова Арктики, масштаб таких карт должен быть не менее 1 : 10 000, и чем дальше на север, тем крупнее. Это связано с тем, что любое уменьшение масштаба в данном случае приведёт к объединению в пределах выделяемых контуров растительных сообществ сразу нескольких синтаксонов, число которых с уменьшением масштаба на каждом этапе генерализации карты будет возрастать. Кроме того, для большинства генерализованных контуров выделение преобладающих синтаксонов, определяющих наименование элементов легенды, будет весьма затруднено, поскольку их доля, как правило, часто не превышает 20–50 %.

Сложность картографирования мелкоконтурного и мозаичного растительного покрова тундры хорошо показал в своей работе В. В. Елсаков (Elsakov, 2023), когда провёл сравнительный анализ карт растительного покрова, полученных по материалам снимков с разным разрешением: аэросъёмки (квадрокоптер DJI Phantom 2 (англ. unmanned aerial vehicle) – UAV, разрешение 0,04 м), снимков сверхвысокого (Quickbird – Qb, 2,4 м) и среднего (Landsat TM5 – L5, 30 м) разрешения для модельного участка на востоке Большеземельской тундры. Вследствие различий по разрешению, зона перекрытия снимков включала разное число пикселей: для UAV – 390,3 млн., Qb – 109,2 тыс., L5 – 699. Сопоставление аэро- и спутниковых изображений показало, что половина изображений Qb содержит неоднородные по составу пиксели UAV с преобладанием в них доминирующего класса легенды менее

50 %, и только у 14,6 % пикселей доля этого класса превышала 80 %. Для L5 количество однородных пикселей (более 50 % поверхности отнесена к одному классу по Qb) не превышало 14,1 %. Причем большая часть (53,8 %) таких гомогенных элементов изображения приходилась на классы водных поверхностей и массивы ивняков. Учитывая, что спектральные сигнатуры разных типов сообществ служат важнейшим критерием для их выделения по материалам многозональных снимков с использованием, например, управляемой классификации, более крупные пиксели спутниковых снимков могут формировать спектральные сигнатуры классов, отсутствующих на территории участка. Так, объединение смешанных сигнатур классов растительного покрова и водных поверхностей в мозаичных пикселях приводило к формированию показателей, близких к эталонам эродированных торфяников. В результате автором установлено наличие весьма слабой степени сходства между классификациями, выполненными на основе UAV и Qb (общая точность – 30,3 %, коэффициент Каппа – 20,7 %), Qb и L5 (44,5 и 30,3 %) и между UAV и L5 (28,5 и 15,5 %). Вместе с тем, возникают очень серьёзные вопросы к классификации растительности картируемого участка, которая положена в основу легенды карт, анализируемых в работе В. В. Елсакова (2023), а именно – к составу синтаксонов территориальных единиц, выделяемых на карте. Легенды этих карт включают 11 элементов, из которых 9 непосредственно к растительности отнести можно, а два – обнажённый торф и водные объекты скорее относятся к типу поверхностей. Хотя автор пишет, что «видовой состав доминирующих растительных сообществ фиксировали в ходе геоботанических исследований» (там же, с. 177), элементы легенды растительности «кустарничково-лишайниковые тундры», «кустарничково-моховые» и другие тундровые сообщества без указания хотя бы преобладающих таксонов, могут относиться, по меньшей мере, к 4 *высшим* синтаксономическим единицам (классам): ***Loiseleurio procumbentis–Vaccinietea*** – тундровые сообщества на кислых почвах лёгкого гранулометрического состава, ***Oxycocco–Sphagnetea*** олиготрофных (омбротрофных) – на бугристых болотах и заболоченных местообитаниях на торфяных почвах, ***Carici arctisibiricae–Hylocomietea alaskani*** – на зональных местообитаниях (плакорах) в условиях средних по параметрам среды, ***Carici rupestris–Kobresietea bellardii*** – на щебнистых субстратах. Подобная и даже ещё более запутанная ситуация складывается и с остальными элементами легенды (ивняки, ерниково-моховые, осоково-моховые, прибрежноводные и осоковые сообщества и др.). В действительности в пределах каждого из этих классов можно выделить сообщества десятков синтаксонов более низкого ранга (союзов, ассоциаций, субассоциаций и др.), которые различаются по видовому разнообразию, экотопическим условиям, устойчивости к внешним воздействиям, а также природоохранной и ресурсной значимости, что в конечном итоге определяет информационную насыщенность карты и возможности её применения для решения научных и прикладных задач. В данном случае наблюдается явный дисбаланс: на фоне углублённого математического анализа спектральных показателей минимальное внимание уделено самому объекту исследования – растительности и точности диагностики типов сообществ (синтаксонов). Учитывая, что ценность картографических материалов определяется в первую очередь содержанием и точностью выделения сообществ синтаксонов разного ранга, неопределенность их синтаксономического положения существенно снижает научную ценность подобных карт и возможности их использования. Ещё в 1966 г. J. Schmithusen писал «Чем точнее систематизированы растительные сообщества, изображенные на карте (субассоциации, варианты, субварианты, фации ассоциаций), ... тем у́же валентность (амплитуда) характерной для этого сообщества среды обитания и тем надёжнее определяющее значение этих сообществ для качества местообитания и границ пространств местообитания» (Schmithusen, 1966: 157). Точность классификации растительности, на основе которой создаётся карта, имеет определяющее значение для подготовки корректных геоботанических карт, которые будут востребованы в областях охраны окружающей среды, устойчивого землепользования и управления ресурсами.

Таким образом, наряду с проблемами, которые возникают при использовании для картографирования спутниковых снимков разного разрешения и неопределённостью синтаксономического состава элементов легенды, имеются серьёзные вопросы, связанные с корректностью классификации растительности на приведённых картах. В результате в подобных исследованиях получаются карты с типами выделов (контуров), синтаксономический состав сообществ которых весьма неясен и, вместе с тем, типы таких «неясных» сообществ в пределах выделенных контуров на снимках разного разрешения значительно различаются. Полагаем, что в данном случае неправомерно говорить о картах растительности (геоботанических картах). По сути, это карты типов земной поверхности или как пишут зарубежные коллеги – «land cover map». Они отображают участки, занятые некими вариантами растительных сообществ или их комбинациями, различимыми физиономически в полевых условиях и на материалах ДЗЗ без диагностики синтаксономического состава выделов.

Применение нейронных сетей для картографирования растительности. В последнее десятилетие широкое применение для создания карт ландшафтов и растительного покрова получили свёрточные нейронные сети (CNN) (Mohanty et al., 2016; Langford et al., 2019; Watanabe et al., 2020; Kislov, Korznikov, 2020; Kislov et al., 2021; Kattenborn et al., 2021; Korznikov et al., 2021, 2023; Ali, Johnson, 2022; Macaulay et al., 2026 и мн. др.). Несмотря на то, что применение CNN является молодой областью исследований, уже сейчас очевидно, что их использование намного превосходит существующие методы обработки спутниковых снимков. В обзорной работе T. Kattenborn с соавторами (2021), посвящённой применению CNN в изучении растительности, изложены основные принципы данного подхода и обоснована его применимость для распознавания на снимках и картографирования типов ландшафта и растительности, а также для анализа динамики растительного покрова. Анализ результатов, приводимых в опубликованных работах показывает, что применение CNN для картографирования растительности позволяет добиться точности моделирования на уровне 80–90 % и более. Учитывая профиль и тематику журнала, в настоящей работе мы не будем детально рассматривать математическое обоснование работы CNN, а остановимся лишь на ключевых аспектах, которые, согласно T. Chachra с соавторами (2025), обеспечили революционный прорыв в анализе материалов ДЗЗ, а именно автоматическое извлечение признаков и надёжное пространственное распознавание объектов. К важнейшим преимуществам CNN относится устойчивость к сдвигу положения объекта во входных данных, что позволяет распознавать объекты на снимке независимо от их местоположения. Наличие прямой связи между конечными и начальными слоями сети обеспечивает лучшее распространение амплитуды изменчивости признака по всей сети и позволяет комбинировать признаки разного уровня. Иерархическая структура сети обеспечивает распознавание объектов на разных масштабных уровнях, что в нашем случае крайне важно для картографирования растительности Арктики, в частности для выделения и диагностики сообществ различных синтаксонов и их комбинаций в условиях мелкоконтурной мозаики растительного покрова. Для каждого уровня используется набор признаков (геоботанических, спектральных, экологических и др.), которые определяют дальнейшую дифференциацию объектов в пределах соответствующего слоя предыдущего уровня. Наличие прямой связи между конечными и начальными слоями CNN обеспечивает лучшее распространение градиента признака по всей сети, что позволяет комбинировать признаки разного уровня и ускоряет обучение. Подобная архитектура также сохраняет размер входного изображения на выходе, благодаря чему результаты сегментации легко совмещаются с исходными данными. Более детально с алгоритмами и особенностями функционирования CNN можно ознакомиться в обзорных работах (Lei et al., 2019; Adegun et al., 2023), а с преимуществами их применения для изучения и картографирования растительности – в упомянутом выше обзоре T. Kattenborn с соавторами (Kattenborn et al., 2021).

Применение CNN U-Net, обученной на независимых данных, при моделировании распространения древесной растительности в Австралии на основе мозаики снимков Earth-i

(*https://earthi.space/*) с разрешением 1 м и тремя спектральными каналами позволило подготовить карту штата Квинсленд (1,73 миллиона км²), точность которой – около 90 % (Flood et al., 2019). Здесь и далее, показатели точности карты – *общая точность* (Overall Accuracy) и *коэффициент Каппа* (Kappa), которые приводятся в процентах или долях от единицы (100 % и 1 – их максимальные значения). При моделировании ландшафтного покрова Финляндии с применением наиболее часто используемых CNN (UNet, DeepLabV3+, PSPNet, BiSeNet, SegNet, FC-DenseNet и FRRN-B) точность карт составила от 87 до 92 % (Scepanovic et al., 2021). Основными исходными данными для этого подхода, по мнению авторов, являются наличие высококачественных снимков с высоким разрешением и трудоёмкий процесс ручного создания (относительно) небольшого обучающего набора данных (в данном случае менее 0,05 % картируемой территории).

Вместе с тем, анализ публикаций по применению CNN для изучения растительности показывает, что большинство современных исследований в этой области посвящено выделению на материалах ДЗЗ отдельных категорий растительного покрова (древесных пород, сельскохозяйственных культур, типов водно-болотных угодий и тропических лесов, и др.) и изучения их динамики под влиянием внешних факторов. Работы по созданию готовых карт растительности пока немногочисленны (Helber et al., 2015; Flood et al., 2019; Langford et al., 2016, 2019; Kattenborn et al., 2019; David et al., 2020; Wagner et al., 2020; Scepanovic et al., 2021 и др.), поскольку в настоящее время идут процессы накопления информации и обучения моделей для распознавания разных типов растительного покрова на основе анализа мультиспектральных и гиперспектральных снимков, особенностей текстуры выделяемых единиц, их формы, геоморфологических, эдафических и других показателей, а также материалов полевых исследований.

В России в 2016 г. А. Ф. Комарова с коллегами (Komarova et al., 2016) при подготовке карт лесов с преобладанием пихты кавказской и ели восточной на Северо-Западном Кавказе по материалам снимков Landsat TM и массива полевых данных с использованием CNN подготовили карту с точностью выделения темнохвойных лесов 95,9 %, индекс Каппа − 0,81. На территории Ханты-Мансийского АО применение модели, основанной на архитектуре нейронной сети DeepLab, позволило определить основные лесотаксационные характеристики, включая преобладающую породу, напочвенный покров и бонитет леса с точностью 88 % и создать актуальные цифровые карты этих характеристик с разрешением 10 м (Moskovchenko, 2023).

К числу перспективных направлений применения CNN в картографировании растительности можно отнести обработку снимков сверхвысокого разрешения, полученных с БПЛА. Применение CNN к данным БПЛА демонстрирует высокий потенциал для создания детальных крупномасштабных карт растительности в условиях, когда спектральной информации спутниковых снимков недостаточно для разделения типов растительного покрова со сложной структурой из-за перекрытия спектров (Sotomayor et al., 2025; Macaulay et al., 2026; и др.). Материалы сверхвысокого разрешения от БПЛА позволяют калибровать спутниковые снимки и валидизировать получаемые карты, существенно повышая их точность. Этот подход наиболее перспективен для картографирования арктической растительности с её мелкоконтурной и мозаичной структурой.

С учётом сложности классификации растительного покрова тундры при использовании снимков разного разрешения, в основе такой работы должны лежать, с одной стороны, классификация растительности участка, базирующаяся на выявлении его синтаксономического разнообразия, по крайней мере до уровня союзов, на основе полевых геоботанических описаний с максимальным охватом разных типов местообитаний, с другой – дешифрирование многозональных или гиперзональных снимков спутников и БПЛА со сверхвысоким разрешением. Другими словами, на первом этапе необходимо выявить синтаксономический состав единиц, которые планируется выделять на карте, а уже затем совершенствовать методы их диагностики на материалах ДЗЗ. В противном случае мы будем иметь обилие *land*

cover maps с весьма неопределённым содержанием в виде «типов растительности» или подобных категорий.

При подготовке карт крупного масштаба наибольшая точность картографических материалов может быть достигнута только при выполнении геоботанических описаний наряду с использованием многозональных и гиперзональных снимков сверхвысокого разрешения. Полагаем, что реальная возможность точного картографирования мелкоконтурного и мозаичного растительного покрова тундры как раз и появилась в последнее десятилетие благодаря свободному доступу к таким снимкам, на которых с высокой долей уверенности можно идентифицировать фитоценозы разных синтаксонов, по меньшей мере, до уровня союза.

Подготовка таких крупномасштабных карт будет служить основой при создании карт более мелкого масштаба. С уменьшением масштаба карты возникает необходимость ее генерализации, что приводит к формированию более крупных выделов, объединяющих в условиях мозаичного растительного покрова множество сообществ разных синтаксонов. Наименования типов таких выделов в легенде обычно даются по преобладающим синтаксонам или «типам» сообществ, доля которых часто составляет менее 50 %. Без учёта бóльшей части синтаксономического разнообразия выделов это значительно снижает информативность карты из-за существенной, даже критической, потери данных. Вместе с тем, именно на основе этой информации можно получить наиболее достоверные и подробные данные об экологических особенностях выделов, их ресурсной и природоохранной значимости, дать оценку ценотического и видового разнообразия, а также максимально точно выявлять изменения, происходящие в растительном покрове под влиянием естественных и антропогенных факторов.

Целью работы было создание серии геоботанических карт разного масштаба для ключевого участка на западе Большеземельской тундры с применением свёрточных нейронных сетей, а также репрезентативной выборки наземных описаний и обучающих точек. В качестве классификационной основы для карт использованы синтаксоны эколого-флористической классификации. Кроме этого, в работе предложен подход, который позволяет *сохранять информацию о синтаксономическом составе сообществ* и их комбинаций в генерализованных выделах и *доле сообществ каждого синтаксона в формировании типов более крупных контуров* мелкомасштабной карты.

Район исследований

Район полевых работ (2009, 2017, 2022, 2025 гг.) расположен на западе Большеземельской тундры в бассейне р. Северная (среднее течение) (рис. 1). В рамках геоботанического районирования территория исследований приурочена к полосе северной лесотундры и находится в центральной части Куйко-Ортинского района Печорско-Хараяхского геоботанического округа, Восточноевропейской подпровинции Европейско-Западносибирской тундровой провинции (Geobotanicheskoe…, 1989; Lavrinenko, 2013). Район расположен в пределах морской аккумулятивной равнины. Преобладающие отложения – верхнеплейстоценовые морские, на западе – аллювиальные верхнечетвертичные. Ландшафт представлен плоской заболоченной аккумулятивной равниной, обрамлённой песчаными грядами и холмами из флювиогляциальных отложений. В центральной части – термокарстовые котловины, озёра и массивы болот.

Материалы и методы

В основе подготовки геоботанических карт лежит проведение полевых работ и выполнение геоботанических описаний на площадках, имеющих географическую привязку. Это позволяет получать наиболее полную информацию о составе и распределении сообществ разных синтаксонов растительности при картографировании ключевого участка. На основе описаний путём обработки и анализа синтаксономических таблиц выполняются классификация, выявление синтаксономического состава растительности участка и подготовка Продромуса. Пере-

чень синтаксонов и их комбинаций служит основой для подготовки легенды геоботанической карты, включающей как синтаксоны разного ранга, так и их комбинации. Точность и информативность содержательной части карт определяются полнотой охвата полевыми описаниями разных типов растительности и степенью выявления её синтаксономического состава.



Рис. 1. Район проведения полевых работ и картируемый участок.

Fig. 1. Area of field work and mapped territory.

Учитывая значительную площадь района и ограниченную возможность дальних пеших маршрутов в условиях сложного пересечённого рельефа и заболоченной территории, до начала работ картируемый участок размерами 30 × 30 км был разделён на 9 секторов (A–I) размерами 10 × 10 км (рис. 2). Для крупномасштабного картографирования (М 1 : 10 000) на первом этапе был выбран сектор E, который, с одной стороны, наиболее изучен: геоботанические описания проводились здесь во все годы исследований, с последующей классификацией растительности и соответствующими публикациями (Lavrinenko, Lavrinenko, 2015, 2018, 2020, 2021; Lavrinenko, Kochergina, 2022; Lavrinenko et al., 2016 a, 2016 b, 2024 a, 2024 b, 2026 a, 2026 b, 2026 c; Matveeva, Lavrinenko, 2021; Vegetation…, 2025, 2026; Sinelnikova et al., 2026 и др.). С другой стороны, разнообразие растительного покрова сектора E практически охватывает таковое для всей картируемой территории, за исключением ельников в долине реки (acc. ***Moehringio lateriflorae–Piceetum obovatae*** O. Lavrinenko et al. 2026).

Общий подход к разработке карты растительности исследуемого района заключался в сегментации спутникового снимка сверхвысокого разрешения (2 м) (Google Earth: в ПО SasPlanet) и классификации объектов с использованием модели CNN TensorFlow eCognition и ПО ArcGIS. Опорные данные для обучения и валидации CNN получены в ходе полевых геоботанических описаний (детальных и кратких маркерных, >250 описаний), экспертного дешифрирования спутникового снимка сверхвысокого разрешения (Google Satellite, 2023, SAS.Planet) и материалов с БПЛА DJI Phantom 4 (рис. 3).

Обучение CNN проводили на примере сектора E, в процессе обучения применялась стратегия Online Hard Example Mining (OHEM): после каждой эпохи и подготовки промежуточного варианта карты рассчитывали точность по классам, для классов с точностью < 70 % добавляли новые обучающие точки. Для оценки точности карты использовали сним-

ки сверхвысокого разрешения и ПО ArcGIS, в которой было использовано более 300 проверочных точек (операция *create accuracy assessment points*) и создана матрица ошибок (*confusion matrix*) с последующим расчётом показателей общей точности и коэффициента Каппа (Olofsson et al., 2014). На последней эпохе общее число точек обучения составило более 10 000 (полевые + экспертные), точность карты растительности на сектор E составила 86 %, коэффициент Каппа 0.85. После этого обученную модель CNN применили ко всему картируемому участку и продолжили обучение, добавляя новые точки как для растительных сообществ, выделенных на предыдущем этапе, так отсутствующих в секторе E. Общее число точек обучения составило более 15 000 (полевые + экспертные).

Оптимальные параметры проведения разноуровневой сегментации (*Scale parameter*) для масштабов 1:10 000, 1:25 000 и 1:100 000 подбирали эмпирически. После сегментации снимка каждому сегменту изображения в зависимости от масштаба был присвоен маркер синтаксона сообщества или их комбинации. Затем сегменты объединяли по типам и экспортировали в векторном формате в ArcGIS для сглаживания и очистки.

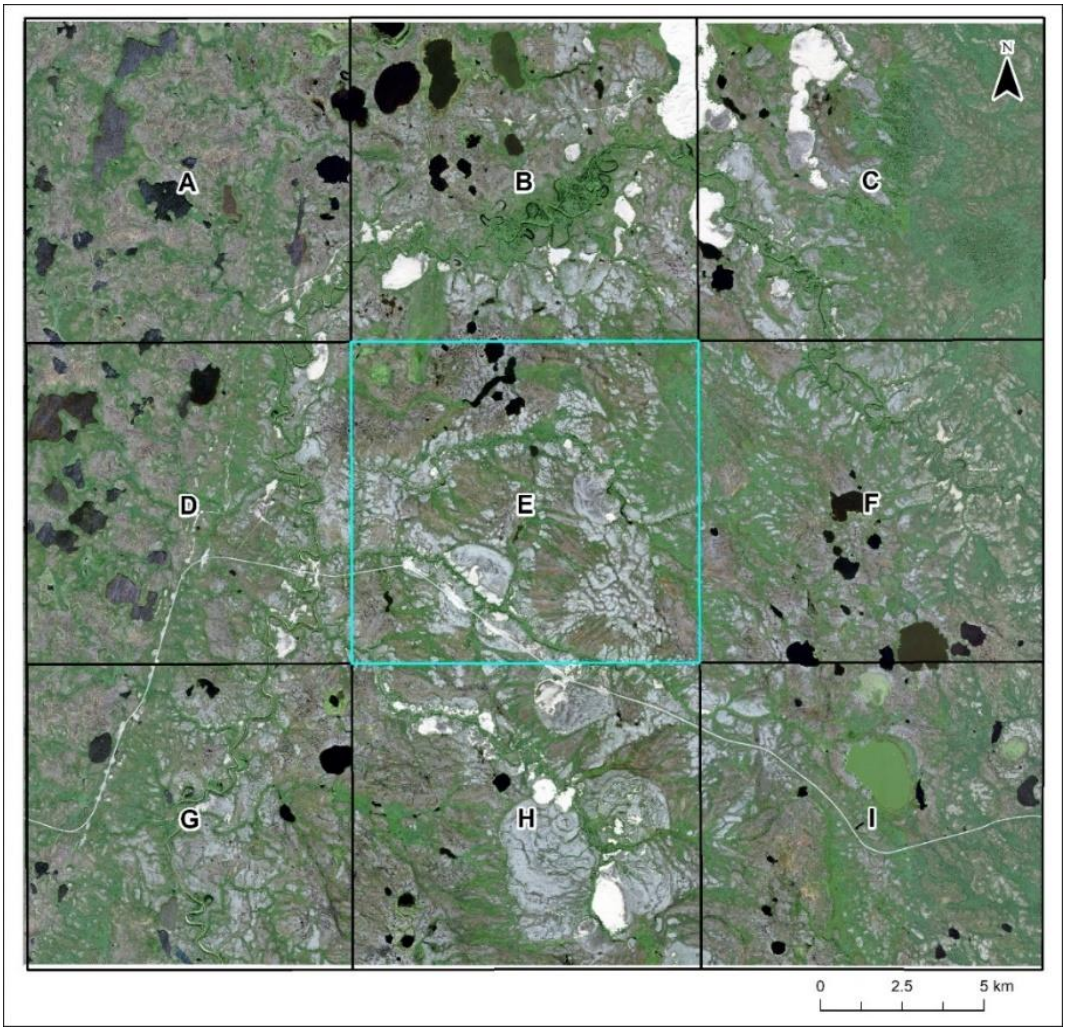


Рис. 2. Спутниковый снимок картируемого участка и его деление на сектора (A-I)

Fig. 2. Satellite image of the mapped area and its division into sectors (A-I)

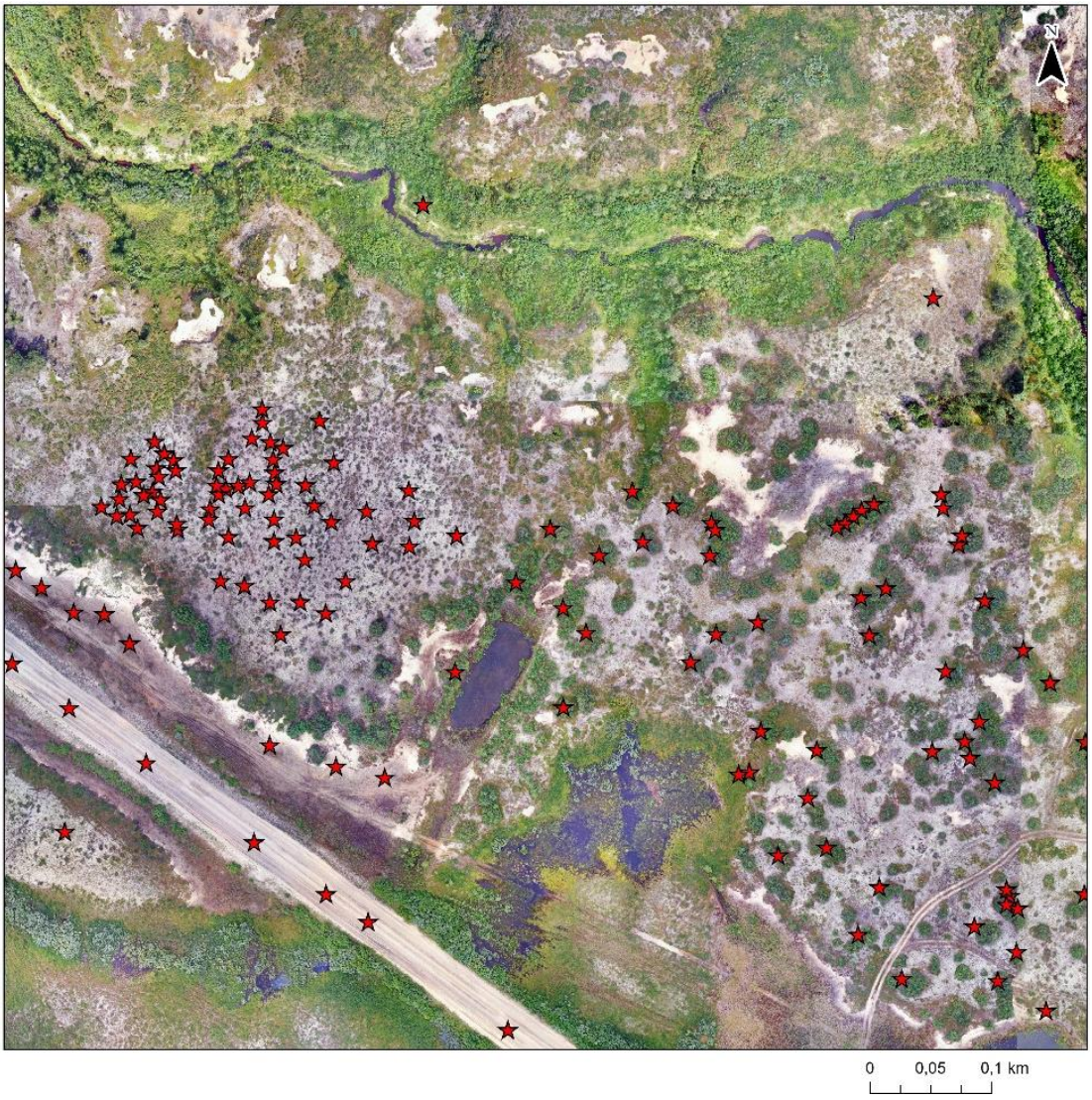


Рис. 3. Фрагмент снимка квадрокоптера Phantom 4 с обучающими точками (красные звездочки).

Fig. 3. Phantom 4 UAV image fragment with ground truth training points (red stars).

Основой для формирования легенд карт послужил Продромус растительности, большинство синтаксонов из которого вошло в «Классификацию растительности России» (Vegetation…, 2025, 2026), охватывающей весь спектр синтаксонов разного ранга, выявленных и описанных на сегодняшний день на территории России – от класса до субассоциации и варианта. Полагаем, что данное 3-х томное издание может служить хорошей основой для формирования наименований типологических единиц при составлении легенд и пояснительных записок к картам, прежде всего крупного масштаба (до 1 : 5 000–1 : 10 000).

В основу подхода к генерализации положен пространственный анализ синтаксономического состава контуров (элементов легенды) крупномасштабной карты и оценка их в таковых для карт более мелкого масштаба. Эту процедуру выполняли в ArcGIS посредством инструмента *Tabulate Area* (кросс-табуляция) между слоями мелко- и крупномасштабной карт.

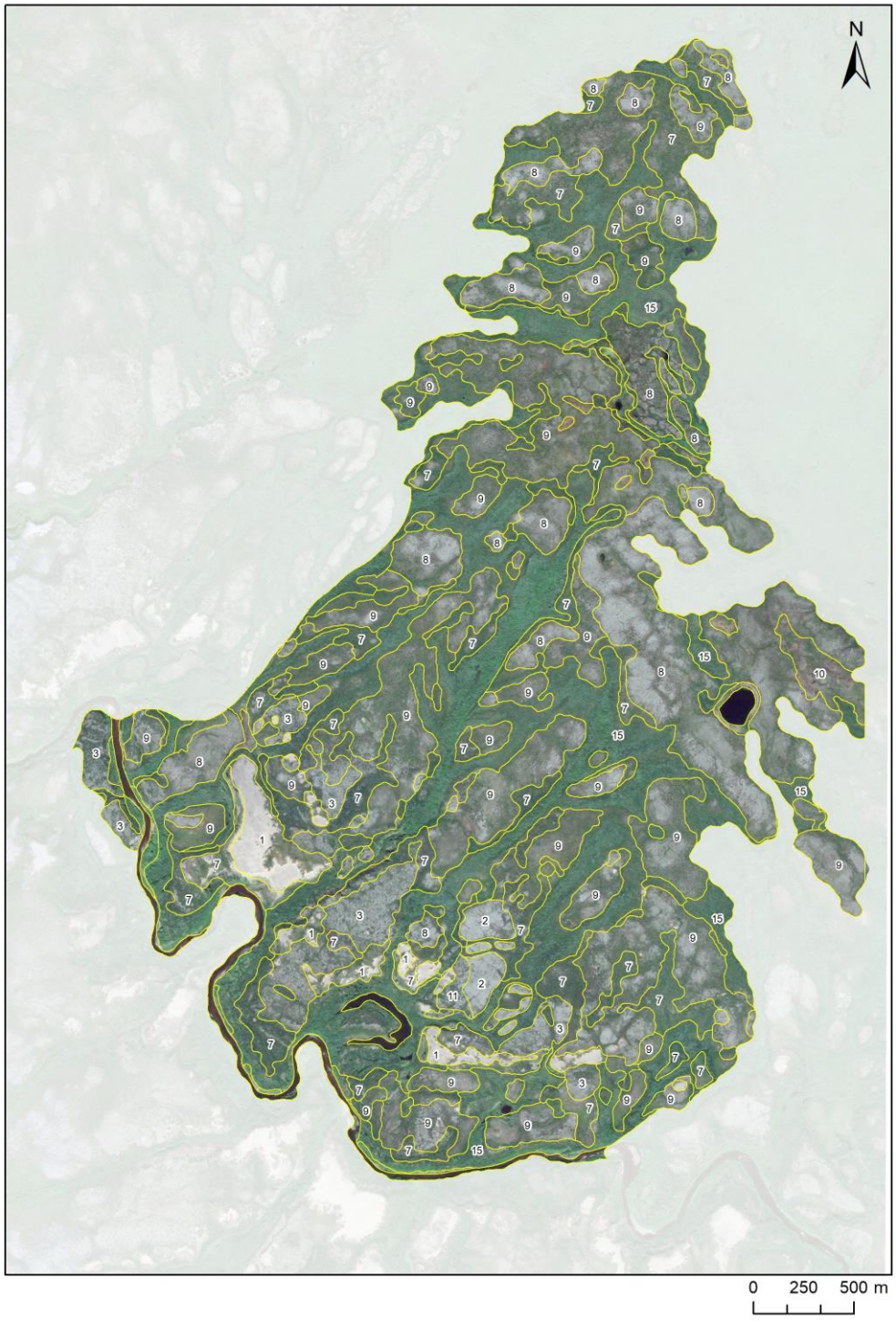


Рис. 4. Пример разнообразия сообществ разных синтаксонов крупномасштабной карты (М 1 : 10 000) и его распределение в пределах контура карты более мелкого масштаба (М 1 : 200 000).

Fig. 4. Diversity of communities of different syntaxa on a large-scale map (1 : 10,000) and their distribution within a small-scale map polygon (1 : 200,000).

Инструмент рассчитывает площади и формирует таблицу, в которой для каждого типа выделов мелкомасштабной карты отмечено, какие контуры крупномасштабной карты в него попадают и какую площадь занимают. Ниже приведён пример, отражающий разнообразие и распределение по площадям сообществ разных синтаксонов крупномасштабной карты (М 1 : 10 000) в пределах крупного контура карты более мелкого масштаба (М 1 : 200 000) (рис. 4), созданной в результате генерализации.

Результаты кросс-табуляции, выраженные в процентах и приведённые в таблице (табл. 1), отражают распределение сообществ разных синтаксонов по площадям в пределах генерализованного контура. Перевод абсолютных значений площадей в проценты позволяет оценить вклад сообществ каждого синтаксона в формирование растительности более крупных выделов разных типов и дать им название по преобладающим синтаксонам.

В данном случае, очевидно, что если по материалам снимков сверхвысокого разрешения и БПЛА подготовлена крупномасштабная геоботаническая карта достаточно высокой точности, то при её генерализации до более мелкого масштаба можно получить информацию о составе синтаксонов сообществ для всех типов выделов мелкомасштабной карты. Причём, подготовку карт меньшего масштаба можно проводить как путём поэтапной генерализации крупномасштабной карты, так и применяя разные варианты классификации спутниковых снимков меньшего разрешения (Sentinel-2A, Landsat 4-9 и др.), независимо от размеров пикселов. Применяя описанную выше кросс-табуляцию слоёв разного масштаба, мы получаем достоверную информацию о синтаксономическом составе сообществ выделенных элементов легенды мелкомасштабной карты и доле участия синтаксонов в формировании более крупных выделов этой карты. Кроме того, один-два преобладающих по площади синтаксона целесообразно использовать для наименования элементов легенды, а синтаксоны сообществ с долей более 5–10 % приводить в пояснительной записке.

Таблица 1

Распределение площадей сообществ синтаксонов, выделенных на карте М 1 : 10 000 в пределах контура карты М 1 : 200 000, полученного при генерализации (рис. 4)

Table 1

Distribution of syntaxa community areas from the 1 : 10,000 map within a generalized 1 : 200,000 map polygon (fig. 4)

Индекс	Сообщество	Синтаксоны	Доля площади, %
9	Багульниково-морошково-кустарничково-моховые (дикрановые и сфагновые) сообщества на торфяных буграх бугристо-топяных болот	***Rubo chamaemori–Dicranetum elongati*** субасс. ***typicum*** вар. ***Ochrolechia frigida***	**29,5**
15	Сообщества кустарниковых ив в поймах тундровых водотоков, ложбинах стока и на коренных склонах долин	***Polemonio acutiflori–Salicion glaucae***	**27,7**
7	Ерниковые сообщества кустарничково-моховые	***Hylocomio–Betuletum nanae***	**16,4**
8	Багульниково-кустарничково-лишайниковые (флавоцетрариевые и кладониевые) сообщества на торфяных буграх бугристо-топяных болот и на минеральных буграх с торфянистыми почвами	***Rubo chamaemori–Dicranetum elongati*** субасс. ***typicum*** вар. ***typica***	**14,1**
3	Мелкоерниковые кустарничково-лишайниковые тундровые сообщества на песках	***Empetro–Betuletum nanae***	4,3
1	Песчаные обнажения, серийные ряды сообществ разной степени сомкнутости.	***Stereocaulon rivulorum***, ***Rumici graminifoliae–Festucetum sabulosae***, ***Empetro hermaphroditi–Salicetum nummulariae***	2,7
16	Пойменные злаковые и разнотравно-злаковые луга	***Astragalo arctici–Bromopsietum inermis*** prov., ***Bromopsio inermis–Calamagrostietum purpureae*** prov.	0,4

Индекс	Сообщество	Синтаксоны	Доля площади, %
10	Осоково-сфагновые сообщества в мало обводнённых топях бугристо-топяных болот	***Carici rariflorae–Sphagnetum baltici***, ***Carici rotundatae–Sphagnetum baltici***	1,5
2	Лишайниковые (кладониевые) и кустарничково-лишайниковые (флавоцетрариевые) тундровые сообщества на песках	***Cladonietum rangiferino-arbusculae***, ***Loiseleurio-Diapensietum*** субасс. ***salicetosum nummulariae***	0,9
17	Прибрежно-водные травяные сообщества по берегам озёр и на обводнённых участках болот	***Arctophiletum fulvae***, ***Caricetum aquatilis***, ***Comaretum palustris***	0,5
11	Осоково-гипновые и осоково-сфагновые сообщества в сильно обводнённых топях бугристо-топяных болот	***Carici stantis–Warnstorfietum exannulatae***, ***Carici rariflorae–Sphagnetum lindbergii***, ***Carici rotundatae–Sphagnetum lindbergii***	0,3
Водные объекты			1,8

При описании и отображении пространственной структуры гетерогенных выделов или комбинаций использованы схематические обозначения, предложенные нами ранее (Lavrinenko, 2020): название серийного ряда предваряется символом «**Θ**», между синтаксонами комбинации ставится стрелка вправо-влево «↔», серия обрамляется угловыми скобками «<» и «>»; наименование комплекса предваряется символом «⊕», между синтаксонами комбинации ставится символ наклонной решетки «#», на первое место ставится синтаксон, приуроченный к положительным формам рельефа, на второе – к отрицательным; сам комплекс обрамляют квадратными скобками «**[ ]**». В случае, когда соотношение между сообществами разных синтаксонов в пределах гетерогенных территориальных единиц было неопределённым, синтаксоны перечисляли через запятую.

Результаты и их обсуждение

В результате полевых исследований и последующей обработки материала выполнена классификация растительности участка и подготовлен сводный список синтаксонов, который положен в основу легенды карт.

Класс ***LOISELEURIO PROCUMBENTIS–VACCINIETEA*** Eggler ex Schubert 1960
Порядок ***Deschampsio flexuosae–Vaccinietalia myrtilli*** Dahl 1957
Союз ***Loiseleurio–Arctostaphylion*** Kalliola ex Nordhagen 1943
Acc. ***Cladonietum rangiferino-arbusculae*** Lavrinenko et Lavrinenko 2020
Acc. ***Empetro–Betuletum nanae*** Nordhagen 1943
Ass. ***Empetro hermaphroditi–Salicetum nummulariae*** Bogdanowskaya-Guihéneuf ex Lavrinenko et Lavrinenko 2020
Acc. ***Loiseleurio–Diapensietum*** (Fries 1913) Nordhagen 1943
Субасс. ***salicetosum nummulariae*** Koroleva 2006
Союз ***Phyllodoco–Vaccinion myrtilli*** Nordhagen 1943
Acc. ***Hylocomio–Betuletum nanae*** Dahl 1956

Класс ***OXYCOCCO–SPHAGNETEA*** Br.-Bl. et Tüxen ex Westhoff et al. 1946
Порядок ***Sphagnetalia medii*** Kästner et Flössner 1933
Союз ***Rubo chamaemori–Dicranion elongati*** Lavrinenko et Lavrinenko 2015
Acc. ***Rubo chamaemori–Dicranetum elongati*** Dedov ex Lavrinenko et Lavrinenko 2015
Субасс. ***typicum***, вар. ***typica***, вар. ***Ochrolechia frigida***

Класс ***SCHEUCHZERIO–CARICETEA NIGRAE*** Tüxen 1937
Порядок ***Caricetalia nigrae*** Koch 1926
Союз ***Drepanocladion exannulati*** Krajina 1933
Acc. ***Carici stantis–Warnstorfietum exannulatae*** Lavrinenko, Matveyeva et Lavrinenko 2016
Acc. ***Carici stantis–Sphagnetum squarrosi*** Lavrinenko, Matveyeva et Lavrinenko 2016
Порядок ***Scheuchzerietalia palustris*** Nordhagen ex Tüxen 1937
Союз ***Scheuchzerion palustris*** Nordhagen ex Tüxen 1937
Подсоюз ***Caricenion rariflorae*** Lavrinenko, Matveyeva et Lavrinenko 2016
Acc. ***Carici rariflorae–Sphagnetum baltici*** Andreev ex Lavrinenko, Matveyeva et Lavrinenko 2016
Acc. ***Carici rariflorae–Sphagnetum lindbergii*** Andreev ex Lavrinenko, Matveyeva et Lavrinenko 2016
Acc. ***Carici rotundatae–Sphagnetum baltici*** Lapshina, Filippov et Ganasevich 2022
Acc. ***Carici rotundatae–Sphagnetum lindbergii*** Nordhagen ex Lapshina in Lapshina et al. 2022

Класс ***POLEMONIO BOREALIS–TANACETETEA BIPINNATI*** Telyatnikov, Ermakov, Ermokhina et Khitun 2025
Порядок ***Polemonio borealis–Tanacetetalia bipinnati*** Telyatnikov, Ermakov, Ermokhina et Khitun 2025
Союз ***Oxytropido sordidae–Tanacetion bipinnati*** Telyatnikov et Prystyazhnyuk ex Telyatnikov, Ermakov, Ermokhina et Khitun 2025
Acc. ***Rumici graminifoliae–Festucetum sabulosae*** Kulyugina 2008

Класс ***MOLINIO–ARRHENATHERETEA*** Tüxen 1937
Порядок ***Molinietalia caeruleae*** Koch 1926
Союз ***Astero sibirici–Bromion inermis*** Lavrinenko, Lavrinenko, Neshataev et Kotlyarchuk 2026
Acc. ***Astragalo arctici–Brometum inermis*** Lavrinenko, Lavrinenko, Neshataev et Kotlyarchuk 2026
Acc. ***Bromo inermis–Calamagrostietum purpureae*** Lavrinenko, Lavrinenko et Kotlyarchuk in Lavrinenko et al. 2026

Класс ***SALICETEA PURPUREAE*** Moor 1958
Порядок ***Salicetalia purpureae*** Moor 1958
Союз ***Galio borealis–Salicion viminalis*** Lavrinenko et Kochergina 2022
Acc. ***Bromopsio inermis–Salicetum viminalis*** Lavrinenko et Kochergina 2022

Класс ***HYLOCOMIO SPLENDENTIS–SALICETEA GLAUCAE*** Sinelnikova, Lavrinenko et Sekretareva 2026
Порядок ***Polemonio acutiflori–Salicetalia glaucae*** Lavrinenko et Kochergina 2022
Союз ***Polemonio acutiflori–Salicion glaucae*** Lavrinenko et Lavrinenko 2021
Acc. ***Carici stantis–Salicetum phylicifoliae*** Lavrinenko et Kochergina 2022
Acc. ***Hylocomio splendentis–Salicetum glaucae*** Lavrinenko et Kochergina 2022

Класс ***PHRAGMITO–MAGNOCARICETEA*** Klika in Klika et Novák 1941
Порядок ***Magnocaricion elatae*** Koch 1926
Союз ***Carici–Rumicion hydrolapathi*** Passarge 1964
Acc. ***Comaretum palustris*** Markov, Belyaeva et Popova 1955
Союз ***Magnocaricion elatae*** Koch 1926
Acc. ***Caricetum aquatilis*** Savich 1926
Порядок ***Oenanthetalia aquaticae*** Hejný ex Balátová-Tuláčková, Mucina, Ellmauer et Wallnöfer 1993
Союз ***Arctophilion fulvae*** Pestryakov et Gogoleva ex Kholod 2007
Acc. ***Arctophiletum fulvae*** Sambuk 1930 mut. Teteryuk 2023

Класс ***VACCINIO–PICEETEA*** Br.-Bl. in Br.-Bl.et al. 1939
Порядок ***Piceo obovatae–Pinetalia sibiricae*** Ermakov 2025
Союз ***Empetro hermaphroditi–Piceion obovatae*** Morozova 2025
Acc. ***Empetro hermaphroditi–Piceetum obovatae*** Morozova 2025 subass. ***arctoetosum alpinae*** O. Lavrinenko in O. Lavrinenko et al. 2026
Союз ***Aconito rubicundi–Abietion sibiricae*** Anekhonov et Chytrý 1998
Подсоюз ***Clematido sibiricae–Piceenion obovatae*** Zaugolnova in Morozova 2025
Acc. ***Moehringio lateriflorae–Piceetum obovatae*** O. Lavrinenko in O. Lavrinenko et al. 2026
Порядок ***Vaccinio myrtilli–Betuletalia pubescentis*** Mucina et Willner in Mucina et al. 2016 nom. inval. et ined.
Союз ***Empetro hermaphroditi–Betulion pumilae*** Lavrinenko et Braslavskaya in Lavrinenko et al. 2026
Acc. ***Empetro hermaphroditi–Betuletum pumilae*** Nordhagen 1943 nom. mut. Lavrinenko et Braslavskaya in Lavrinenko et al. 2026
Acc. ***Vaccinio myrtilli–Betuletum pumilae*** Nordhagen 1943 nom. mut. Lavrinenko et Braslavskaya in Lavrinenko et al. 2026

Сообщество ***Cetrariella delisei–Gymnocolea inflata***

Всего установлено 22 синтаксона ранга ассоциации и субассоциации, и 1 сообщество.

Геоботанические карты ключевого участка в бассейне р. Северная

Для ключевого участка подготовлены карты растительности в масштабах 1 : 10 000, 1 : 25 000 и 1 : 100 000. Общая площадь закартированной территории составила 88 758,2 га, из которых водные объекты занимают около 4 546 га. Карта масштаба 1 : 10 000 наиболее подробно отражает синтаксономическое разнообразие растительности и его распределение по территории. Она послужила основой для генерализации и подготовки легенд к картам масштабов 1 : 25 000 и 1 : 100 000. Для карты масштаба 1 : 100 000 характерно преобладание комбинаций сообществ разных синтаксонов. Легенды всех карт упрощены и адаптированы для облегчения восприятия. Содержание элементов легенды и их синтаксономический состав более подробно раскрывается в тексте, следующем за легендой.

Особую сложность при картографировании вызвало разделение на снимке комплексов бугристо-топяных болот, занимающих около 50 % территории, в связи со значительным варьированием соотношения площадей бугров и топей даже в пределах небольших участков. Пространственная структура болотных комплексов также крайне изменчива – обычны

варианты грядово-топяной, плоскобугристо- и мелкобугристо-топяной, сетчатой и иных типов, а также переходных форм. Вместе с тем, состав синтаксонов растительности бугров и топей при разных соотношениях элементов комплекса практически не меняется. Поскольку на данном этапе одной из основных задач было сохранение перечня синтаксонов для выделов при генерализации карты, мы решили не учитывать все приведённые выше вариации пространственной структуры при картографировании растительности таких болот. За основу их деления приняли два основных критерия: *общее соотношение бугров и топей* и *синтаксономический состав сообществ, преобладающих на этих элементах.* В первом случае, при отчётливом преобладании какого-либо элемента (более, чем на 70 %), для бугров и топей на карте и в легенде выделяли две соответствующие категории бугристо-топяных комплексов. При близком соотношении долей этих элементов или некотором (30–70 %) преобладании бугров или топей в пределах контура, они также выделены в отдельную категорию. Во втором случае, в пределах каждой из категорий оценивали участие в формировании растительного покрова этих элементов разных синтаксонов: для бугров – это ***Rubo chamaemori–Dicranetum elongati*** субасс. ***typicum*** вар. ***Ochrolechia frigida*** и вар. ***typica***, для топей – ***Carici rariflorae–Sphagnetum baltici***, ***Carici stantis–Warnstorfietum exannulatae*** и др. Перечисленные варианты структуры хорошо различаются как при визуальном дешифрировании снимка, так и при нанесении обучающих точек для CNN. При генерализации карт и присвоении наименований элементам легенды, преобладающие синтаксоны определяли на основании результатов кросс-табуляции слоёв разных масштабов.

Геоботаническая карта М 1 : 10 000

Легенда карты наиболее крупного масштаба 1:10 000 (рис. 5) содержит 23 элемента, включающие как отдельные синтаксоны, так и их комбинации. Для иллюстрации элементов легенды, приведённой на рис. 5, ниже даны наименование растительности и её синтаксономический состав. Для иллюстрации представлены фотографии, а в ряде случаев для картируемых комплексов – спутниковые снимки сверхвысокого разрешения или материалы съемки с БПЛА Phantom 4, отражающие особенности их пространственной структуры.

1. Серийные ряды сообществ разной степени сомкнутости на песчаных обнажениях водораздела, часто с галькой, аккумулированной на поверхности.

Синтаксоны (комбинация): **Θ** <***Stereocaulon rivulorum*** ↔ ***Rumici graminifoliae–Festucetum sabulosae*** ↔ ***Empetro hermaphroditi–Salicetum nummulariae***>.

2. Лишайниковые (кладониевые) и кустарничково-лишайниковые (флавоцентрариевые) тундры на песчаных слабо наклонённых поверхностях водоразделов, на внешних пологих или покатых склонах сопок с котловинами выдувания на вершинах, на ветрообдуваемых местообитаниях и хорошо дренированных автоморфных кислых почвах (рис. 6).

Синтаксоны: ***Cladonietum rangiferino-arbusculae***, ***Loiseleurio-Diapensietum*** субасс. ***salicetosum nummulariae***.

3. Мелкоерниковые кустарничково-лишайниковые тундры на выположенных поверхностях водоразделов с умеренным снегонакоплением, на кислых почвах лёгкого гранулометрического состава (пески, супеси) (рис. 7).

Синтаксон: ***Empetro–Betuletum nanae***.

4. Сообщества с участием тёмноокрашенных лишайников-психрофитов (*Cetrariella delisei*, *Arctocetraria andrejevii*) и печёночника (*Gymnocolea inflata*) в выположенных блюдцеобразных и вытянутых понижениях (пятна вымокания) в пределах плоских песчаных террас, занятых кустарничково-лишайниковой тундрой (рис. 8).

Синтаксон: ***Cetrariella delisei–Gymnocolea inflata*** com.

5. Комплекс «парковых» берёзовых криволесий (*Betula pubescens* var. *pumila*) с кустарничково-зеленомошным фитоценотическим полем под кронами деревьев и кустарничково-лишайниковым или мелкоерниково-кустарничково-лишайниковым сообществом на открытых участках на оподзоленных подбурах (рис. 9).

Синтаксоны(комбинация): ⊕ [***Empetro hermaphroditi–Betuletum pumilae # Loiseleurio–Diapensietum*** субасс. ***salicetosum nummulariae***, ***Empetro–Betuletum nanae***].

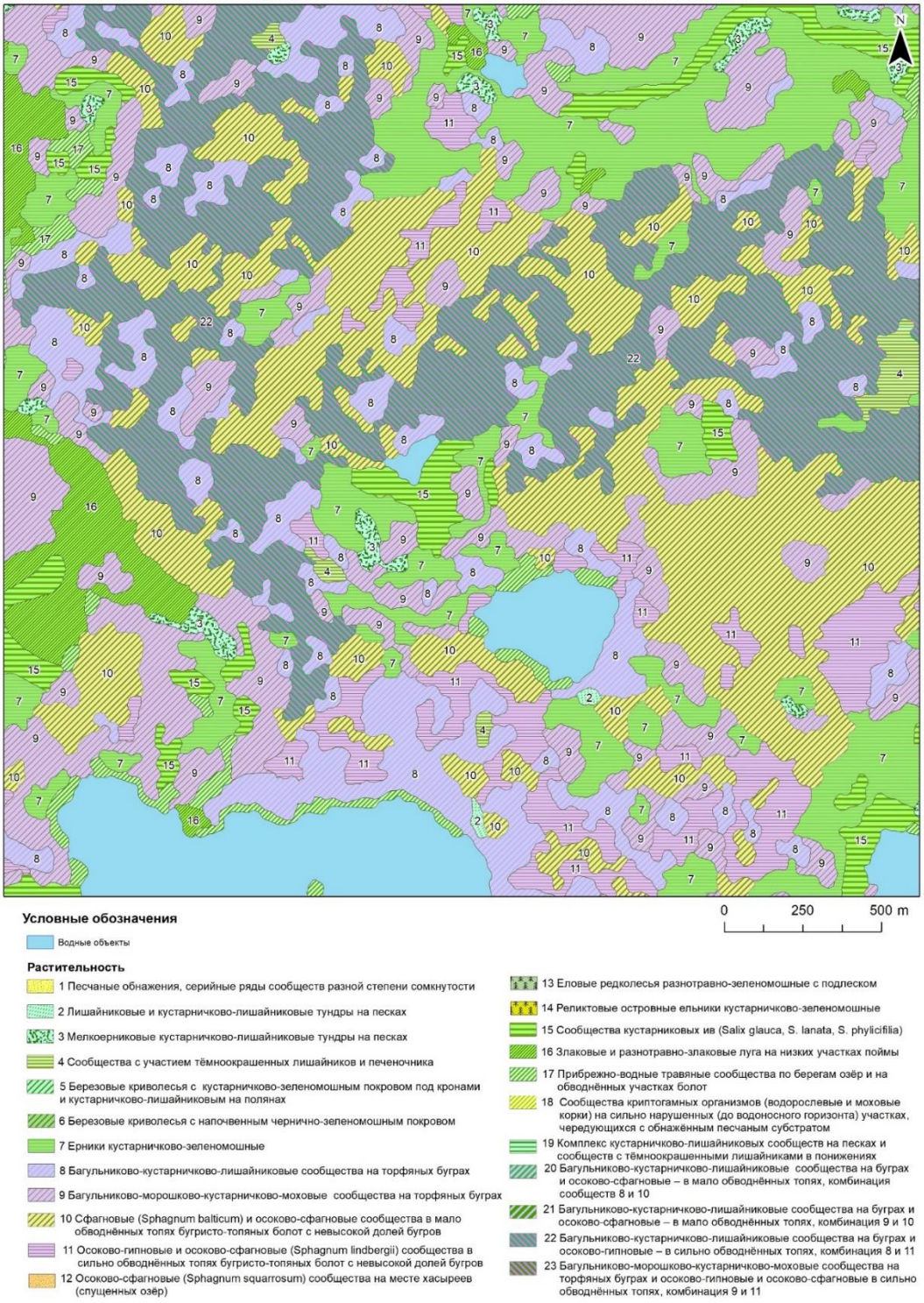


Рис. 5. Фрагмент карты М 1 : 10 000 на территорию ключевого участка в бассейне р. Северная.

Fig. 5. Fragment of a geobotanical map at 1 : 10,000 scale for the key study area in the Severnaya River basin.

6. Берёзовые криволесья (*Betula pubescens* var. *pumila*) с напочвенным черничнозеленомошным покровом на выположенных понижениях водоразделов с достаточно длительным залеганием снежного покрова и хорошей влагообеспеченностью.

Синтаксон: ***Vaccinio myrtilli–Betuletum pumilae***.

7. Ерники кустарничково-зеленомошные на слабо наклонённых оторфованных и умеренно заболоченных участках водоразделов, полосы на бровках коренных склонов долины.

Синтаксон: ***Hylocomio–Betuletum nanae***.

8. Багульниково-кустарничково-лишайниковые (флавоцетрариевые) сообщества на слабо расчленённых торфяных буграх в пределах бугристо-топяных комплексов и на минеральных буграх с торфянистыми почвами; рассматриваются также как элемент комплекса в более мелком масштабе.

Синтаксон: ***Rubo chamaemori–Dicranetum elongati*** субасс. ***typicum*** вар. ***typica***.

9. Багульниково-морошково-кустарничково-моховые (дикрановые и сфагновые) сообщества на плоских торфяных буграх в пределах бугристо-топяных болот; рассматриваются также как элемент комплекса в более мелком масштабе.

Синтаксон: ***Rubo chamaemori–Dicranetum elongati*** субасс. ***typicum*** вар. ***Ochrolechia frigida***.

10. Сфагновые (*Sphagnum balticum*) и осоково-сфагновые сообщества в мало обводнённых топях бугристо-топяных болот с невысокой долей бугров.

Синтаксоны (комбинация): ⊕ [***Rubo chamaemori–Dicranetum elongati # Carici rariflorae–Sphagnetum baltici, Carici rotundatae–Sphagnetum baltici***].

11. Осоково-гипновые и осоково-сфагновые (*Sphagnum lindbergii*) сообщества в сильно обводнённых топях бугристо-топяных болот с невысокой долей бугров, обычно с сетчатой пространственной структурой.

Синтаксоны (комбинация): ⊕ [***Rubo chamaemori–Dicranetum elongati # Carici stantis–Warnstorfietum exannulatae***, ***Carici rariflorae–Sphagnetum lindbergii***, ***Carici rotundatae–Sphagnetum lindbergii***].

12. Осоково-сфагновые (*Sphagnum squarrosum*) сообщества на месте хасыреев (спущенных озёр), изредка в пределах бугристо-топяных комплексов в местах с проточным увлажнением (рис. 10).

Синтаксон: ***Carici stantis–Sphagnetum squarrosi***

13. Еловые редколесья разнотравно-зеленомошные с ерниково-ивовым подлеском в хорошо дренированных местообитаниях в долине реки на подзолистых и аллювиальных гумусовых почвах.

Синтаксон: ***Moehringio lateriflorae–Piceetum obovatae delphinietosum elati***

14. Реликтовые островные ельники кустарничково-зеленомошные, территориально связанные с песчаными обнажениями на повышенных элементах рельефа водоразделов и бровках склонов речных долин (рис. 11).

Синтаксон: ***Empetro hermaphroditi–Piceetum obovatae arctoetosum alpinae***

15. Сообщества кустарниковых ив (*Salix glauca, S. lanata, S. phylicifolia*) в поймах тундровых водотоков, ложбинах стока и на коренных склонах долин.

Синтаксоны: ***Polemonio acutiflorum–Salicion glaucae***, ***Hylocomio splendentis–Salicetum glaucae, Carici stantis–Salicetum phylicifoliae***.

16. Злаковые и разнотравно-злаковые луга на низких, регулярно заливаемых участках поймы водотоков.

Синтаксоны: ***Astragalo arctici–Brometum inermis***, ***Bromio inermis–Calamagrostietum purpureae***.

17. Прибрежно-водные травяные сообщества по берегам озёр и на обводнённых участках болот. Из-за сложности экспертной диагностики таких синтаксонов по-отдельности на материалах ДЗЗ, ассоциации объединены в одну группу сообществ, зарегистрированных при проведении полевых работ.

Синтаксоны: ***Arctophiletum fulvae***, ***Caricetum aquatilis***, ***Comaretum palustris***.



Рис. 6. Кустарничково-флавоцетрариевые тундры на обширном плато водораздела.

Fig. 6. Dwarf shrub-lichen (*Flavocetraria nivalis*) tundra on an extensive plateau of the watershed.



Рис. 7. Мелкоерниковая кустарничково-лишайниковая тундра на песчаном субстрате.

Fig. 7. Dwarf birch–shrub–lichen tundra on sandy substrate.



Рис. 8. Пятно вымокания с *Cetrariella delisei* на плато, покрытом кустарничково-лишайниковой тундрой на песках.

Fig. 8. A wetting patch with *Cetrariella delisei* on a plateau covered with dwarf shrub–lichen tundra on sands.



Рис. 9. Парковый березняк с кустарничково-зеленомошным фитоценотическим полем под кронами берёз и кустарничково-лишайниковым сообществом на открытых участках.

Fig. 9. Park-like birch forest with a dwarf shrub–green moss phytocoenotic field under birch canopies and a dwarf shrub–lichen community in open areas.



Рис. 10. Хасырей в пределах обширного бугристо-топяного комплекса.

Fig. 10. Drained lake within an extensive palsa bogs.



Рис. 11. Островной ельник на периферии песчаного обнажения на водоразделе.

Fig. 11. Relict spruce patches on the sandy exposure periphery on the watershed.

18. Сообщества криптогамных организмов (водорослевые и моховые корки) на сильно нарушенных (до водоносного горизонта) при строительстве дороги участках, чередующихся с участками обнажённого песка.

19. Комплекс кустарничково-лишайниковых тундровых сообществ на песках и сообществ с тёмноокрашенными лишайниками (*Cetrariella delisei, Arctocetraria andrejevii*) в неглубоких понижениях, комбинация сообществ 2 и 4 (номера в легенде) (рис. 12).

Синтаксоны (комбинация). ⊕ [***Loiseleurio-Diapensietum*** субасс. ***salicetosum nummulariae # Cetrariella delisei–Gymnocolea inflata*** com.].



Рис. 12. Комплекс кустарничково-лишайниковых тундр на песках и понижений с *Cetrariella delisei*

Fig. 12. A complex of dwarf shrub–lichen tundras on sands and depressions with *Cetrariella delisei*.

20. Багульниково-кустарничково-лишайниковые сообщества на буграх и осоково-сфагновые – в мало обводнённых топях бугристо-топяных болот, комбинация сообществ 8 и 10.

Синтаксоны (комбинация). ⊕ [***Rubo chamaemori–Dicranetum elongati*** субасс. ***typicum*** вар. ***typica # Carici rariflorae–Sphagnetum baltici***, ***Carici rotundatae–Sphagnetum baltici***].

21. Багульниково-морошково-кустарничково-моховые (дикрановые и сфагновые) сообщества на торфяных буграх и осоково-сфагновые – в мало обводнённых топях бугристо-топяных болот, комбинация сообществ 9 и 10.

Синтаксоны (комбинация). ⊕ [***Rubo chamaemori–Dicranetum elongati*** субасс. ***typicum*** вар. ***Ochrolechia frigida # Carici rariflorae–Sphagnetum baltici***, ***Carici rotundatae–Sphagnetum baltici***].

22. Багульниково-кустарничково-лишайниковые сообщества на буграх и осоково-гипновые – в сильно обводнённых топях бугристо-топяных болот, комбинация сообществ 8 и 11.

Синтаксоны (комбинация). ⊕ [***Rubo chamaemori–Dicranetum elongati*** субасс. ***typicum*** вар. ***typica # Carici stantis–Warnstorfietum exannulatae***].

23. Багульниково-морошково-кустарничково-моховые сообщества на торфяных буграх и осоково-гипновые и осоково-сфагновые сообщества в сильно обводнённых топях бугристо-топяных болот, комбинация сообществ 9 и 11.

Синтаксоны (комбинация). ⊕ [***Rubo chamaemori–Dicranetum elongati # Carici stantis–Warnstorfietum exannulatae***, ***Carici rariflorae–Sphagnetum lindbergii***, ***Carici rotundatae–Sphagnetum lindbergii***].

В табл. 2 отражено распределение площадей, занятых разными растительными сообществами в пределах закартированной территории.

Таблица 2

Распределение площадей, занятых различными типами сообществ, на геоботанической карте М:10 000

Table 2

Spatial distribution of areas occupied by various plant community types on the geobotanical map M:10 000

№ п. п.	Сообщество	Индекс на карте	Площадь	
			га	%
1	Сообщества кустарниковых ив (*Salix glauca, S. lanata, S. phylicifilia*) в поймах тундровых водотоков, ложбинах стока и на коренных склонах долин	15	15 255,3	17,2
2	Багульниково-морошково-кустарничково-моховые (дикрановые и сфагновые) сообщества на плоских торфяных буграх в пределах бугристо-топяных болот	9	14 087,0	15,9
3	Ерники кустарничково-зеленомошные на слабо наклонённых оторфованных и умеренно заболоченных участках водоразделов, полосы на бровках коренных склонов долины	7	10 704,3	12,1
4	Багульниково-кустарничково-лишайниковые (флавоцетрариевые) сообщества на слабо расчленённых торфяных буграх в пределах бугристо-топяных комплексов и на минеральных буграх с торфянистыми почвами	8	8 893,0	10,0
5	Сфагновые (*Sphagnum balticum*) и осоково-сфагновые сообщества в мало обводнённых топях бугристо-топяных болот с невысокой долей бугров	10	8 581,9	9,7
6	Осоково-гипновые и осоково-сфагновые (*Sphagnum lindbergii*) сообщества в сильно обводнённых топях бугристо-топяных болот с невысокой долей бугров	11	8 499,2	9,6
7	Мелкоерниковые кустарничково-лишайниковые тундры на выположенных поверхностях водоразделов с умеренным снегонакоплением	3	3 273,9	3,6
8	Песчаные обнажения, серийные ряды сообществ разной степени сомкнутости	1	2 785,8	3,1
9	Прибрежно-водные травяные сообщества по берегам озёр и на обводнённых участках болот	17	2 235,3	2,5
10	Багульниково-кустарничково-лишайниковые сообщества на буграх и осоково-гипновые – в сильно обводнённых топях бугристо-топяных болот, комбинация сообществ 8 и 11	22	1 815,5	2,1
11	Лишайниковые (кладониевые) и кустарничково-лишайниковые (флавоцентрариевые) тундры на песчаных слабо наклонённых поверхностях водоразделов.	2	1 590,9	1,8
12	Злаковые и разнотравно-злаковые луга на низких, регулярно заливаемых участках поймы водотоков	16	1 245,8	1,4
13	Сообщества с участием тёмноокрашенных лишайников-психрофитов (*Cetrariella delisei, Arctocetraria andrejevii*) и печеночника (*Gymnocolea inflata*) в выположенных блюдцеобразных и вытянутых понижениях	4	1 159,2	1,3
14	Еловые редколесья разнотравно-зеленомошные с ерниково-ивовым подлеском в хорошо дренированных местообитаниях в долине реки Северная	13	936,1	1,1
15	Осоково-сфагновые (*Sphagnum squarrosum*) сообщества на месте хасыреев (спущенных озёр), изредка в пределах бугристо-топяных комплексов в местах с проточным увлажнением	12	897,9	1,0
16	Комплекс «парковых» березовых криволесий (*Betula pubescens* var. *pumila*) с кустарничково-зеленомошным фитоценотическим полем под кронами деревьев и кустарничково-лишайниковым или мелкоерниково-кустарничково-лишайниковым сообществом	5	719,2	0,8
17	Багульниково-морошково-кустарничково-моховые сообщества на торфяных буграх и осоково-гипновые и осоково-сфагновые сообщества в сильно обводнённых топях бугристо-топяных болот, комбинация сообществ 9 и 11	23	573,6	0,7
18	Багульниково-морошково-кустарничково-моховые (дикрановые и сфагновые) сообщества на торфяных буграх и осоково-сфагновые – в мало обводнённых топях бугристо-топяных болот, комбинация сообществ 9 и 10	21	418,0	0,4

№ п. п.	Сообщество	Индекс на карте	Площадь	
			га	%
19	Сообщества криптогамных организмов (водорослевые и моховые корки) на сильно нарушенных (до водоносного горизонта) при строительстве дороги участках, чередующихся с участками обнажённого песка	18	199,4	0,2
20	Комплекс кустарничково-лишайниковых сообществ на песках и тёмноокрашенных сообществ с *Cetrariella delisei* в неглубоких понижениях, комбинация сообществ 2 и 4	19	190,8	0,2
21	Багульниково-кустарничково-лишайниковые (флавоцетрариевые) сообщества на буграх и осоково-сфагновые – в мало обводнённых топях бугристо-топяных болот, комбинация сообществ 8 и 10	20	107,0	0,1
22	Берёзовые криволесья (*Betula pubescens* var. *pumila*) с напочвенным чернично-зеленомошным покровом	6	28,7	0,03
23	Реликтовые островные ельники кустарничково-зеленомошные	14	13,9	0,02
	Водные объекты		4 546,4	5,1
	Всего		**88 758,2**	**100,0**

Геоботаническая карта ключевого участка в бассейне р. Северная, М 1 : 25 000

Фрагмент геоботанической карты ключевого участка в бассейне р. Северная в масштабе 1 : 25 000, содержательная часть которой была подготовлена путем генерализации карты масштаба 1 : 10 000 и последующей кросс-табуляции слоев этих карт, показан на рис. 13. Типологические единицы в легенде карты масштаба 1 : 25 000 представлены 18-ю элементами, включающими сообщества как отдельных синтаксонов, так и их комбинаций.

В табл. 3 отражено распределение по площадям сообществ разных синтаксонов растительности, выделенных на карте масштаба 1 : 10 000 (строки 1–23), в пределах контуров карты масштаба 1 : 25 000 (столбцы 1–18), выраженное в процентах, а также площади, которые занимают эти сообщества в пределах типологических единиц, приведённых в легенде карты (1–18). Видим, что генерализация карты при относительно небольшом уменьшении масштаба с 1 : 10 000 до 1 : 25 000 привела к объединению отдельных территориально сопряженных сообществ, которые на местности зачастую постепенно сменяют друг друга и образуют переходные варианты ($2–3^{M10} \rightarrow 3^{M25}$, где 2–3 и 3 – номера в легендах карт масштабов М10 – М 1 : 10 000, М25 – М 1 : 25 000) или формируют мелкоконтурную мозаику сообществ разных синтаксонов и их комбинаций ($8–9^{M10} \rightarrow 7^{M25}$), разделение которых в данном масштабе невозможно. Вместе с тем, в атрибутивной таблице сохраняется полный перечень сообществ и синтаксонов, имеющих место в единицах карты 1 : 10 000.

На основе данных табл. 3 ниже приведены номера наименований элементов легенды на карте масштаба 1:25 000 и перечень синтаксонов сообществ, которые участвуют в формировании типов выделов с учётом занимаемых ими площадей. Синтаксоны, доля которых в генерализованных выделах превышает 10 %, приведены п/ж курсивом, от 5 до 10 % – простым курсивом, менее 5 % не учтены.

Перечень синтаксонов территориальных единиц на карте М 1 : 25 000

1. Песчаные обнажения, серийные ряды сообществ разной степени сомкнутости.

Синтаксоны

Открытые пески

Rumici graminifoliae–Festucetum sabulosae

Empetro hermaphroditi–Salicetum nummulariae

Polytrichum piliferum

Stereocaulon rivulorum

2. Лишайниковые (кладониевые), кустарничково-лишайниковые (флавоцентрариевые) и мелкоерниковые кустарничково-лишайниковые тундры.

Синтаксоны

Cladonietum rangiferino-arbusculae

Loiseleurio-Diapensietum salicetosum nummulariae

Empetro–Betuletum nanae

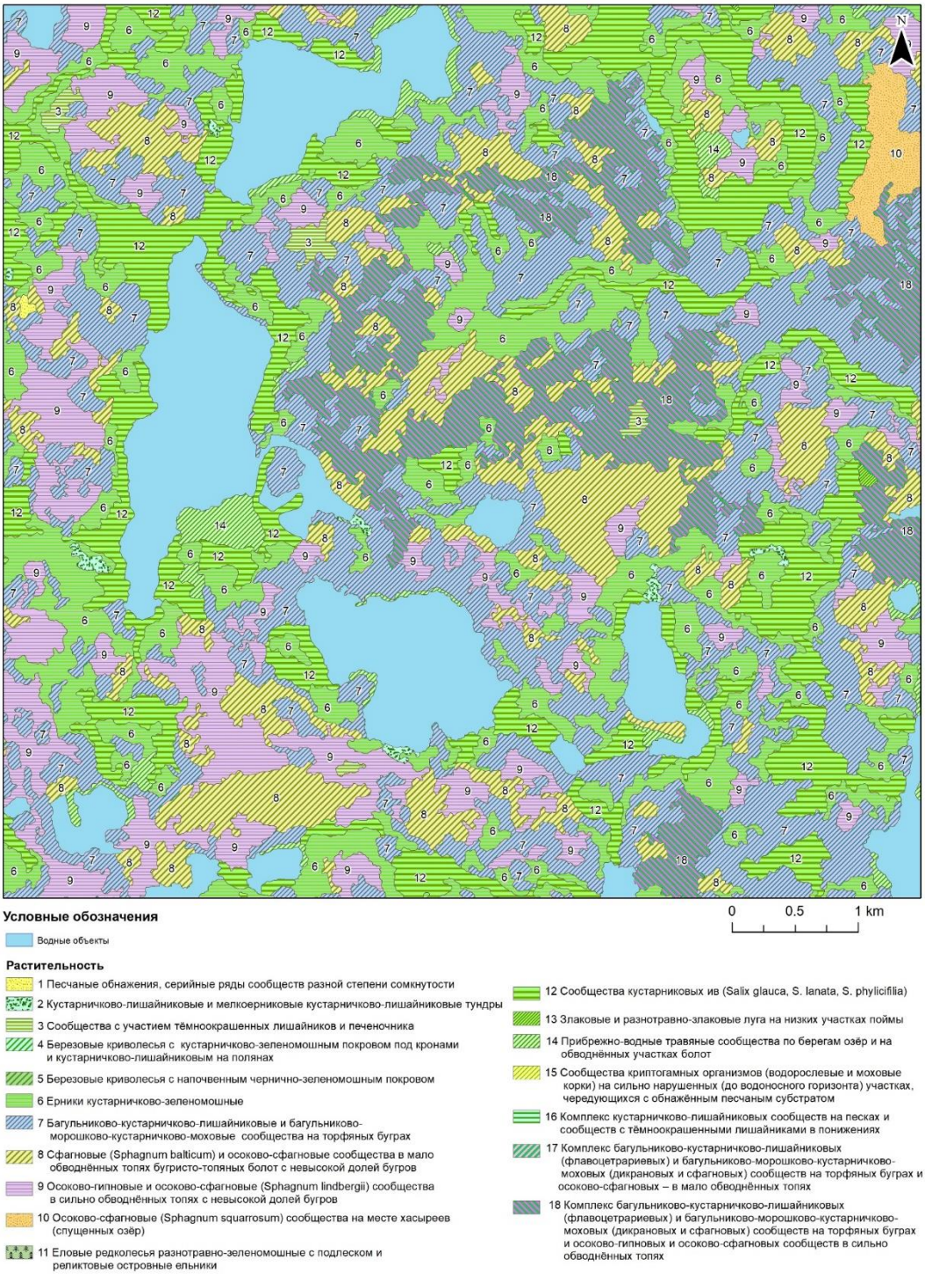


Рис. 13. Фрагмент карты М 1 : 25 000 на территорию ключевого участка в бассейне р. Северная.

Fig. 13. Fragment of a geobotanical map at 1 : 25,000 scale for the key study area in the Severnaya River basin.

Таблица 3

Доля площадей (в %), занимаемых сообществами синтаксонов на карте М 1 : 10 000, в пределах контуров карты М 1 : 25 000.

Table 3

Proportion of area (in %) covered by syntaxon communities on a 1 : 10,000 scale map, delineated within the contours of a 1 : 25,000 scale map.

Элементы легенды карты М 1 : 10 000	Элементы легенды карты М 1 : 25 000																	
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**	**12**	**13**	**14**	**15**	**16**	**17**	**18**
1	**90**	+	+	+									+		+			
2	+	**30**	+	+												5		
3		**56**	+	+		+	+					+	+		+	+		
4	+	+	**85**															
5	+	+		**86**								+	+		+			
6					**94**													
7		+	+			**83**	+	+	+	+		+	+	+	+	+	+	+
8		+	+			+	**33**	+	8					+	+	+	5	7
9	+	+		+	+	5	**55**	+	+		+	+	+	+	+		+	+
10						+	+	**91**	+				+	+			+	+
11		+	+			+	+	+	**85**	+					+		+	
12										**94**								
13											**97**							
14											+							
15	+		+	+	+	+	+			+		**87**	+	+	+			
16	+											+	**87**		+			
17						+	+	+	+	+		+		**85**				
18					+										**87**			
19			+													**91**		
20																	**18**	
21																	**71**	
22																		**65**
23																		**21**
Площадь, га	**2 826,0**	**4 351,7**	**992,1**	**406,3**	**24,8**	**10 510,3**	**23 033,4**	**8 447,5**	**8 733,0**	**956,6**	**936,8**	**16 792,4**	**970,1**	**1 197,0**	**197,3**	**157,7**	**589,2**	**2 773,6**

Примечание. Здесь и в табл. 4 «+» – доля сообществ синтаксона в генерализованных контурах менее 5 %, п/ж шрифтом – с долей более 10 %, серой заливкой выделены синтаксоны и их комбинации (строки), которые были объединены в столбцах при генерализации карты.

3. Сообщества с участием тёмноокрашенных лишайников-психрофитов (*Cetrariella delisei*, *Arctocetraria andrejevii*) и печеночника (*Gymnocolea inflata*) в выположенных понижениях.

Синтаксоны

Cetraria delisei–Gymnocolea inflate com.

4. Комплекс «парковых» берёзовых криволесий (*Betula pubescens* var. *pumila*) с кустарничково-зеленомошным фитоценотическим полем под кронами деревьев и кустарничково-лишайниковым или мелкоерниково-кустарничково-лишайниковым сообществом.

Синтаксоны

Empetro hermaphroditi–Betuletum pumilae

Loiseleurio-Diapensietum salicetosum nummulariae

Empetro–Betuletum nanae

5. Берёзовые криволесья (*Betula pubescens* var. *pumila*) с чернично-зеленомошным покровом.

Синтаксоны

Vaccinio myrtilli–Betuletum pumilae

6. Ерники кустарничково-зеленомошные.

Синтаксоны

Hylocomio–Betuletum nanae

Rubo chamaemori–Dicranetum elongati субасс. *typicum* вар. *Ochrolechia frigida*

7. Багульниково-кустарничково-лишайниковые (флавоцетрариевые) и багульниково-морошково-кустарничково-моховые (дикрановые и сфагновые) сообщества на плоских торфяных буграх в пределах бугристо-топяных болот.

Синтаксоны

Rubo chamaemori–Dicranetum elongati субасс. ***typicum*** субасс. ***typicum*** вар. ***typica***

Rubo chamaemori–Dicranetum elongati субасс. ***typicum*** вар. ***Ochrolechia frigida***

8. Сфагновые (*Sphagnum balticum*) и осоково-сфагновые сообщества в мало обводнённых топях бугристо-топяных болот с невысокой долей бугров.

Синтаксоны

Carici rariflorae–Sphagnetum baltici

Rubo chamaemori–Dicranetum elongati субасс. *typicum* вар. *Ochrolechia frigida*

9. Осоково-гипновые и осоково-сфагновые (*Sphagnum lindbergii*) сообщества в сильно обводнённых топях бугристо-топяных болот с невысокой долей бугров, покрытых багульниково-кустарничково-лишайниковыми (флавоцетрариевыми) сообществами.

Синтаксоны

Carici stantis–Warnstorfietum exannulatae субасс. ***typicum***

Carici rariflorae–Sphagnetum lindbergii,

Carici rotundatae–Sphagnetum lindbergii

Rubo chamaemori–Dicranetum elongati субасс. *typicum* субасс. *typicum* вар. *typica*

10. Осоково-сфагновые (*Sphagnum squarrosum*) сообщества на месте хасыреев (спущенных озёр).

Синтаксоны

Carici stantis–Sphagnetum squarrosi

11. Еловые редколесья разнотравно-зеленомошные с ерниково-ивовым подлеском в хорошо дренированных местообитаниях в долине реки Северная и реликтовые островные ельники.

Синтаксоны

Moehringio lateriflorae–Piceetum obovatae delphinietosum elati

Empetro hermaphroditi–Piceetum obovatae arctoetosum alpinae. Хотя доля сообществ этой ассоциации меньше 5 %, они постоянный и типичный элемент ключевого участка, который необходимо обязательно учитывать при инвентаризации синтаксономического разнообразия территории и подготовке карт крупного масштаба.

12. Сообщества кустарниковых ив (*Salix glauca, S. lanata, S. phylicifilia*) в поймах тундровых водотоков, ложбинах стока и на коренных склонах долин.

Синтаксоны

Polemonio acutiflorum–Salicion glaucae

Carici stantis–Salicetum phylicifoliae

Hylocomio splendentis–Salicetum glaucae

13. Злаковые и разнотравно-злаковые луга на низких, регулярно заливаемых участках поймы водотоков.

Синтаксоны

Astragalo arctici–Brometum inermis

Bromo inermis–Calamagrostietum purpureae

14. Прибрежно-водные травяные сообщества по берегам озёр и на обводнённых участках болот.

Синтаксоны

Caricetum aquatilis

Arctophiletum fulvae

Comaretum palustris

15. Сообщества криптогамных организмов (водорослевые и моховые корки) на сильно нарушенных (до водоносного горизонта) при строительстве дороги участках, чередующихся с участками обнажённого песка.

16. Комплекс кустарничково-лишайниковых тундровых сообществ на песках и тёмноокрашенных сообществ с *Cetrariella delisei* в неглубоких понижениях.

Синтаксоны

Cladonietum rangiferino-arbusculae

Loiseleurio-Diapensietum

Cetraria delisei–Gymnocolea inflate com.

Empetro–Betuletum nanae

17. Комплекс багульниково-кустарничково-лишайниковых (флавоцетрариевых) и багульниково-морошково-кустарничково-моховых (дикрановых и сфагновых) сообществ на торфяных буграх и осоково-сфагновых – в мало обводнённых топях бугристо-топяных болот.

Синтаксоны

Rubo chamaemori–Dicranetum elongati субасс. ***typicum*** субасс. ***typicum*** вар. ***typica***

Rubo chamaemori–Dicranetum elongati субасс. ***typicum*** вар. ***Ochrolechia frigida***

Carici rariflorae–Sphagnetum baltici

18. Комплекс багульниково-кустарничково-лишайниковых (флавоцетрариевых) и багульниково-морошково-кустарничково-моховых (дикрановых и сфагновых) сообществ на торфяных буграх и осоково-гипновых и осоково-сфагновых сообществ в сильно обводнённых топях бугристо-топяных болот.

Синтаксоны

Rubo chamaemori–Dicranetum elongati субасс. ***typicum*** вар. ***typica***

Rubo chamaemori–Dicranetum elongati субасс. ***typicum*** вар. ***Ochrolechia frigida***

Carici stantis–Warnstorfietum exannulatae субасс. ***typicum***

Carici rariflorae–Sphagnetum lindbergii

Carici rotundatae–Sphagnetum lindbergii

Геоботаническая карта ключевого участка в бассейне р. Северная, М 1 : 100 000

Фрагмент геоботанической карты ключевого участка в бассейне р. Северная, в масштабе 1 : 100 000 показан на рис. 14. Он отражает распределение по территории сообществ разных синтаксонов и их комбинаций, которые в легенде представлены 11-ю элементами.

Генерализация карты при переходе от масштаба 1 : 10 000 к 1 : 100 000 привела к объединению значительной части типологических единиц, представленных в легенде более крупномасштабной карты (табл. 4). Вместе с тем, как и на предыдущем этапе генерализации, для каждой типологической единицы карты масштаба 1 : 100 000 в атрибутивной таблице сохраняется полный перечень сообществ и синтаксонов, присутствовавших в единицах карты 1 : 10 000 с учётом доли их участия в площади генерализованных выделов.

На основе данных табл. 4 далее приводятся номера, наименования элементов легенды карты масштаба 1 : 25 000 и перечень синтаксонов сообществ, которые участвуют в формировании типов выделов с учётом занимаемых ими площадей.

1. Песчаные обнажения, серийные ряды сообществ разной степени сомкнутости, сообщества криптогамных организмов (водорослевые и моховые корки) на сильно нарушенных участках.

Синтаксоны

Открытые пески

Rumici graminifoliae–Festucetum sabulosae

Empetro hermaphroditi–Salicetum nummulariae

Polytrichum piliferum

Stereocaulon rivulorum

2. Лишайниковые (кладониевые), кустарничково-лишайниковые (флавоцентрариевые) и мелкоерниковые кустарничково-лишайниковые тундры, местами с участием тёмноокрашенных лишайников-психрофитов (*Cetrariella delisei*, *Arctocetraria andrejevii*) и печеночника (*Gymnocolea inflata*) в выположенных понижениях.

Синтаксоны

Cladonietum rangiferino-arbusculae

Loiseleurio-Diapensietum salicetosum nummulariae

Empetro–Betuletum nanae

Cetraria delisei–Gymnocolea inflate com.

Hylocomio–Betuletum nanae

3. Берёзовые криволесья (*Betula pubescens* var. *pumila*), включая комплекс с кустарничково-зеленомошным фитоценотическим полем под кронами деревьев и кустарничково-лишайниковым или мелкоерниково-кустарничково-лишайниковым сообществом на полянах, и криволесья с чернично-зеленомошным покровом.

Синтаксоны

Empetro hermaphroditi–Betuletum pumilae

Loiseleurio–Diapensietum salicetosum nummulariae

Empetro–Betuletum nanae

Vaccinio myrtilli–Betuletum pumilae

Rubo chamaemori–Dicranetum elongati

Polemonio acutiflorum–Salicion glaucae

Carici stantis–Salicetum phylicifoliae

Hylocomio splendentis–Salicetum glaucae

Песчаные обнажения

4. Ерники кустарничково-зеленомошные.

Синтаксоны

Hylocomio–Betuletum nanae

Empetro–Betuletum nanae

Rubo chamaemori–Dicranetum elongati вар. *Ochrolechia frigida*

5. Багульниково-кустарничково-лишайниковые и багульниково-морошково-кустарничково-моховые сообщества на торфяных буграх, осоково-гипновые и осоково-сфагновые в топях бугристо-топяных болот с преобладанием торфяных бугров (>70 %).

Синтаксоны

Rubo chamaemori–Dicranetum elongati субасс. ***typicum*** субасс. ***typicum*** вар. ***typica***

Rubo chamaemori–Dicranetum elongati субасс. ***typicum*** вар. ***Ochrolechia frigida***

Hylocomio–Betuletum nanae

Carici stantis–Warnstorfietum exannulatae субасс. *typicum*

Carici rariflorae–Sphagnetum lindbergii

Carici rotundatae–Sphagnetum lindbergii

6. Багульниково-кустарничково-лишайниковые и багульниково-морошково-кустарничково-моховые сообщества на торфяных буграх, осоково-гипновые и осоково-сфагновые в топях бугристо-топяных болот с преобладанием осоково-сфагновых топей (>70 %).

Синтаксоны

Carici rariflorae–Sphagnetum baltici

Carici stantis–Warnstorfietum exannulatae субасс. *typicum*

Carici rariflorae–Sphagnetum lindbergii

Carici rotundatae–Sphagnetum lindbergii

Rubo chamaemori–Dicranetum elongati субасс. *typicum* вар. *Ochrolechia frigida*

Rubo chamaemori–Dicranetum elongati субасс. *typicum* вар. *typica*

7. Багульниково-кустарничково-лишайниковые и багульниково-морошково-кустарничково-моховые сообщества на торфяных буграх, осоково-гипновые и осоково-сфагновые в топях бугристо-топяных болот с варьированием соотношения бугров и топей (30–70 %)

Синтаксоны

Rubo chamaemori–Dicranetum elongati субасс. ***typicum*** вар. ***typica***

Carici stantis–Warnstorfietum exannulatae субасс. ***typicum***
Carici rariflorae–Sphagnetum lindbergii
Carici rotundatae–Sphagnetum lindbergii
Rubo chamaemori–Dicranetum elongati субасс. *typicum* вар. *Ochrolechia frigida*
Carici rariflorae–Sphagnetum baltici

8. Осоково-сфагновые (*Sphagnum squarrosum*) сообщества на месте хасыреев (спущенных озёр).

Синтаксоны

Carici stantis–Sphagnetum squarrosi

9. Еловые редколесья разнотравно-зеленомошные в долине р. Северная и реликтовые островные ельники.

Синтаксоны

Moehringio lateriflorae–Piceetum obovatae delphinietosum elati
Empetro hermaphroditi–Piceetum obovatae arctoetosum alpinae

10. Сообщества кустарниковых ив (*Salix glauca, S. lanata, S. phylicifilia*), злаковых и разнотравно-злаковых лугов в долинах тундровых водотоков, на склонах ложбин стока и коренных террас.

Синтаксоны

Polemonio acutiflorum–Salicion glaucae
Carici stantis–Salicetum phylicifoliae
Hylocomio splendentis–Salicetum glaucae
Hylocomio–Betuletum nanae
Rubo chamaemori–Dicranetum elongati вар. *Ochrolechia frigida*
Astragalo arctici–Brometum inermis
Bromo inermis–Calamagrostietum purpureae

11. Прибрежно-водные травяные сообщества по берегам озёр и на обводнённых участках болот.

Синтаксоны

Caricetum aquatilis
Arctophiletum fulvae
Comaretum palustris

Наибольшие площади в пределах картируемой территории занимают массивы болотных фитоценозов (Табл. 2, индексы 9, 8, 10, 11) и сообщества кустарников, включающие ивняки и ерники (Табл. 2, индексы 15, 7) – по 44–45 %. Первые, несмотря на ограниченность синтаксономического состава, значительно варьируют как по преобладанию сообществ тех или иных синтаксонов в комбинациях, включая обилие переходных форм, так и по своеобразию пространственной структуры, обусловленном, прежде всего, криогенными процессами. Всё это, безусловно, затрудняет картографирование таких объектов даже с применением нейронных сетей. Тем не менее, в рамках настоящей работы именно особенности пространственной структуры болотных массивов использованы в качестве важнейших диагностических признаков для их дифференциации. Более того, используя растительность как индикатор при выделении тех или иных категорий местообитаний, например, для представителей животного мира, а также в качестве кормовой базы для оленеводства, особенности пространственной организации болотных комплексов и соотношение их различных элементов, наряду с синтаксономическим составом, будут определяющими при выделении тех или иных категорий местообитаний или пастбищ. Ивовые и ерниковые сообщества хорошо определяются по материалах съёмки и приурочены к склонам и понижениям рельефа, включая местообитания ложбин стока, долину р. Северная, а также часто обрамляют болотные массивы и озёра. Третье место по площади (около 8 %) занимают сообщества на местообитаниях с песчаным субстратом.

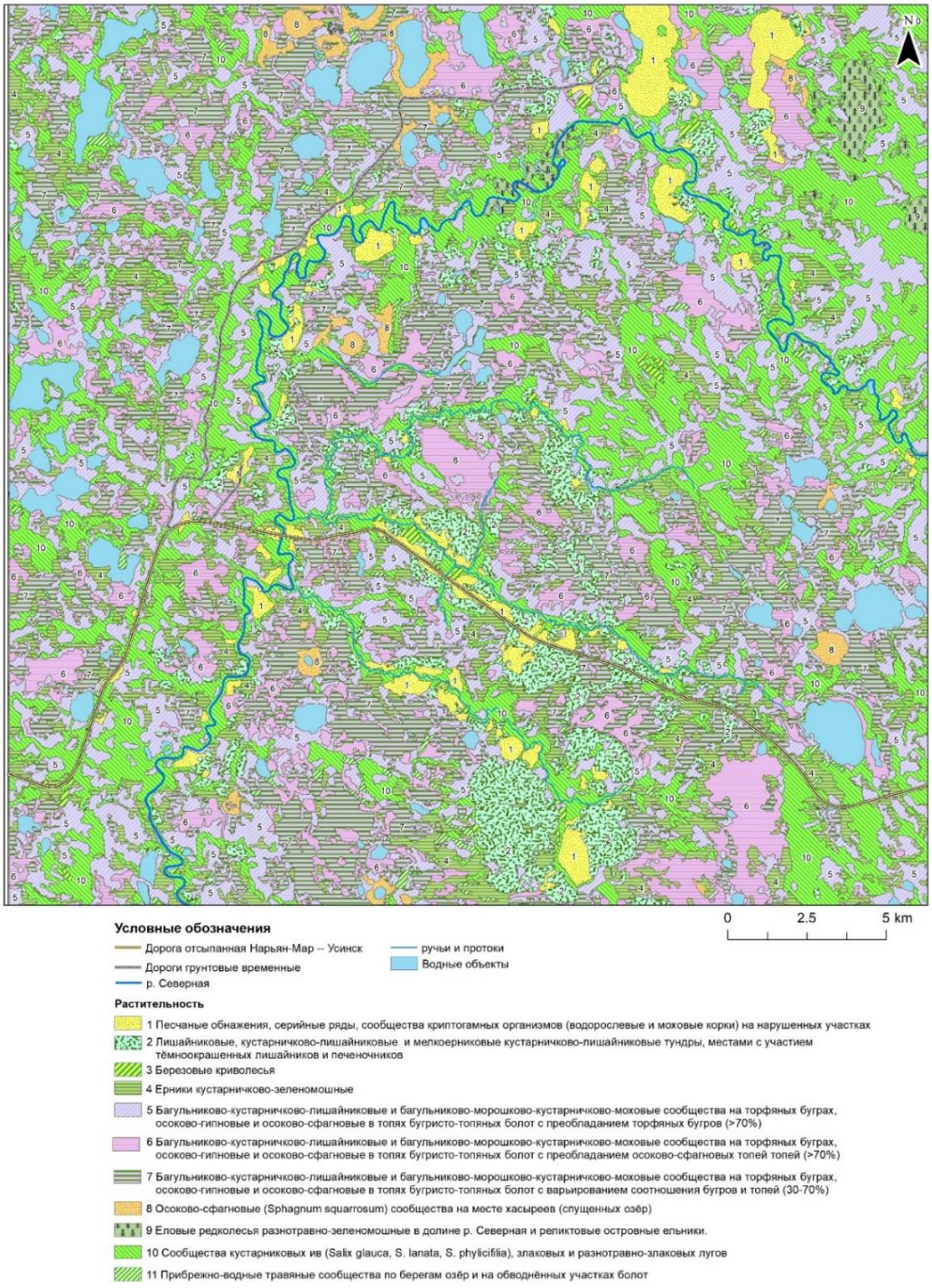


Рис. 14. Фрагмент карты М 1:100 000 на территорию ключевого участка в бассейне р. Северная.

Fig. 14. Fragment of a geobotanical map at 1:100,000 scale for the key study area in the Severnaya River basin.

Таблица 4

Доля площадей (в %), занимаемых сообществами синтаксонов на карте М 1 : 10 000, в пределах контуров карты М 1 : 100 000

Table 4

Proportion of area (%) occupied by syntaxon communities on a 1:10,000 scale map, within the contours of a 1 : 100,000 scale map

Элементы легенды карты М 1 : 10 000	Элементы легенды карты М 1 : 100 000										
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**	**8**	**9**	**10**	**11**
1	**82**	+	5							+	
2	+	**24**	+							+	
3	+	**37**	5	**15**	+					+	+
4	+	**18**	+								
5	+	+	**69**							+	
6			7								
7	+	5		**71**	8	+	+	+		6	7
8		+		+	**28**	+	**14**	+		+	+
9	+	+	+	5	**50**	5	+	+	+	5	6
10	+			+	+	**76**	7			+	+
11		+		+	5	5	**53**	+			+
12								**89**			
13									**95**		
14									+		
15	+	+	5	+	+			+	+	**73**	6
16	+									5	
17				+	+	+	+	+		+	**69**
18	6										
19		+									
20						+					
21						5					
22							**14**				
23							5				
Площадь, га	**2 862.1**	**5 283.3**	**260.0**	**9 787.4**	**22 477.3**	**8 707.2**	**12 312.7**	**992.5**	**891.8**	**19 397.5**	**716.8**

Перечисленные категории сообществ в сумме занимают более 90 % территории картируемого участка, что хорошо отражает своеобразие ландшафта – плоской заболоченной аккумулятивной равнины с песчаными грядами и вскрытыми флювиогляциальными отложениями (песчаные обнажения), обилием небольших термокарстовых озёр и достаточно густой сети ложбин стока.

Таким образом, применение CNN для дешифрирования спутниковых снимков сверхвысокого разрешения на основе репрезентативной выборки обучающих данных позволило достаточно точно распознавать растительные сообщества ключевого участка на уровне синтаксонов ранга ассоциаций и субассоциаций, а также их комбинаций. Высокое пространственное разрешение снимков обеспечило выявление различий между ними, что ранее было возможно только при наземном дешифрировании.

Использование в настоящей работе синтаксонов эколого-флористической классификации для диагностики типов территориальных единиц, выделяемых на карте, обеспечило их формализацию на основе одной из наиболее распространённых международных классификационных систем. Это предопределяет сопоставимость полученных данных с материалами других отечественных и зарубежных фитосоциологов, и открывает возможности для проведения их сравнительного анализа. Однако ключевым достоинством предложенного подхода, как представляется, является обеспечение коммуникации «на одном языке» между специалистами по классификации растительности и геоботаниками-картографами. Трудно признать нормальной ситуацию, при которой классификация растительности и её картографирование (геоботаническое картографирование) существуют в двух независимых друг

от друга плоскостях, а на карту наносятся типы растительности, наименования которым присваиваются авторами, зачастую весьма далёкими от геоботаники, и исключительно исходя из их собственных представлений о том, как следует классифицировать растительность. Многообразие существующих в настоящее время карт растительности (имеются в виду прежде всего карты крупного масштаба), подходов к их созданию, а также легенд, в которых обычно приводятся названия «типов растительности» и, в лучшем случае, указывается несколько доминирующих видов, привело к обилию авторских «классификаций», создаваемых под эти карты. Зачастую весьма сложно разобраться в том, какой синтаксон или синтаксоны скрываются за тем или иным элементом легенды, не говоря уже о возможности провести сравнительный анализ растительности, представленной на картах для разных регионов. А учитывая, что за каждым синтаксоном стоят экологические особенности местообитания, видовое разнообразие, ресурсная и природоохранная значимость, применение вышеупомянутых карт как в научных, так и в прикладных исследованиях весьма проблематично. Полагаем, что геоботаника – это всё-таки точная наука и в основе геоботанического картографирования должно лежать не просто выделение на карте тех или иных типов сообществ и присвоение им названия, а, прежде всего, характеристика синтаксономического состава этих сообществ в соответствии с выбранной классификацией.

В рамках предлагаемого подхода вместо использования весьма неопределённых единиц («кустарничково-лишайниковые тундры», «берёзово-еловые леса») на карту предлагается наносить названия синтаксонов описанных сообществ либо их комбинаций. За каждым синтаксоном стоят опубликованные данные, обосновывающие его валидность и положение в иерархии классификационной системы. Более того, каждый тип выдела на карте получает содержательное наполнение на основании анализа источников валидизации: список видов с их обилием, экологическую характеристику местообитания, а на основе списка видов – сведения о ресурсной и природоохранной значимости. В связи с этим мы рассматриваем серийное издание труда «Классификация растительности России» (Vegetation…, 2025, 2026) в качестве руководства и информационной основы при создании легенд и пояснительных записок к геоботаническим картам крупного масштаба. В этом издании приведён перечень синтаксонов разного ранга, описанных на территории нашей страны, с указанием их диагностических видов, экологии местообитаний и источников информации о валидности синтаксона. Выход этой работы, содержащей перечень синтаксонов, описанных на территории России, безусловно, позволит перевести картографирование растительности на качественно новый уровень – использование синтаксонов разного ранга и их комбинаций для наименования типов выделов на картах разного масштаба. Содержание карт и синтаксономический состав выделяемых единиц в данном случае будут основаны, с одной стороны, на фактологическом материале, полученном специалистами в ходе полевых работ, а с другой – на единой номенклатуре наименований, определяемой Кодексом (Theurillat et al., 2021). Полагаем, что корректность геоботанических карт, востребованных в сферах охраны окружающей среды, устойчивого землепользования и управления ресурсами, напрямую зависит от точности классификации растительности, выделяемой на карте и используемой при составлении легенды и пояснительной записки. Нанесение на карту выделов, представленных сообществами синтаксонов, отсутствующих в имеющейся «Классификации …», должно предваряться их публикацией в соответствующих журналах.

Предложенный подход к пространственной генерализации базируется на принципе сохранения синтаксономического состава и приоритетном выделении синтаксонов, сообщества которых доминируют по площади в укрупнённых выделах. В рамках исследования на основе снимков сверхвысокого разрешения и данных БПЛА создана крупномасштабная геоботаническая карта (М 1:10 000), отличающаяся высокой точностью. Последующая генерализация до масштабов 1:25 000 и 1:100 000 и применение кросс-табуляции слоёв позволили не только сохранить информацию о синтаксономическом составе сообществ, но и количественно отразить долю их участия в структуре укрупнённых выделов более мелкомасштабных карт.

Настоящая работа является одним из этапов программы по классификации и картографированию растительности восточноевропейских тундр, которая базируется на материалах многолетних полевых исследований, выполненных в период с 1996 по 2025 гг. Сформированная база геоданных включает свыше 4 000 полных геоботанических описаний и порядка 6 000 маркерных точек с координатной привязкой и фотографиями; описаниями охвачено более 70 ключевых участков на разных ландшафтных и зональных позициях. Этот массив данных послужил основой для классификации растительности региона: выделенные синтаксоны охарактеризованы в оригинальных статьях и обобщены в «Классификации растительности России» (Vegetation…, 2025, 2026).

Территория восточноевропейских тундр, как и Арктика в целом, сегодня многократно покрыта спутниковыми снимками сверхвысокого разрешения, находящимися в открытом доступе. Кроме того, за последнее десятилетие на ключевых участках нами получено более 600 000 аэрофотоснимков с БПЛА, на которых достаточно полно представлено синтаксономическое разнообразие растительности изученных территорий. Сочетание репрезентативной сети наземных данных и дистанционных материалов сверхвысокого разрешения обеспечивает надёжный фундамент и открывает широкие возможности для создания точных крупномасштабных геоботанических карт и их последующей генерализации для большинства геоботанических районов восточноевропейских тундр.

Заключение

Применение свёрточных нейронных сетей для дешифрирования спутниковых снимков сверхвысокого разрешения на основе репрезентативной обучающей выборки позволило с высокой точностью распознать различные растительные сообщества ключевого участка на уровне ассоциаций, субассоциаций и их комбинаций, выявляя различия, ранее доступные лишь при наземном дешифрировании.

Использование эколого-флористической классификации для диагностики картографических единиц обеспечило их строгую формализацию в рамках международной синтаксономической системы. Такой подход устраняет проблему «авторских» легенд и создаёт единый язык коммуникации между фитосоциологами и геоботаниками-картографами: каждый выдел получает не условное наименование, а содержательное наполнение – за наименованиями в легенде карты и пояснительной записке стоят валидные синтаксоны, списки видов, экологическая характеристика местообитаний, а на основе списков – сведения о ресурсной и природоохранной значимости. Выход «Классификации растительности России» рассматривается как основа для перевода крупномасштабного картографирования на качественно новый уровень, при котором выделы обозначаются синтаксонами разного ранга и их комбинациями, валидность которых подтверждена публикациями и регулируется Кодексом фитосоциологической номенклатуры. Применение «Классификации …» позволяет внести единообразие в формирование легенд и пояснительных записок к геоботаническим картам крупного масштаба, значительно повысить точность и информативность их содержания. Благодаря высокой диагностической роли синтаксонов, такие карты будут служить основой для создания широкого спектра тематических карт, отражающих экологическое состояние территории и местообитаний. И, безусловно, они также представляют собой основу для организации мониторинга растительного покрова и местообитаний с последующей оценкой трансформации границ и синтаксономического состава выделяемых на карте единиц под влиянием климатических и антропогенных факторов.

Подход к пространственной генерализации, основанный на сохранении синтаксономического состава и приоритетном выделении доминирующих по площади синтаксонов, позволил при переходе от карты масштаба 1:10 000 к масштабам 1:25 000 и 1:100 000 не только сохранить, но и количественно отразить долю участия каждого синтаксона в структуре укрупнённых выделов.

Исследование выполнено в рамках плановой темы Лаборатории динамики растительного покрова тундры № 125020701745-6 «Динамические процессы в растительном покрове Арктики, а также сценарии их развития под воздействием природных и антропогенных факторов».

Прежде всего, хочу выразить глубокую благодарность О. В. Лавриненко за всестороннее обсуждение различных аспектов настоящей работы и помощь при диагностике синтаксонов, а также за замечания при анализе рукописи. Особо хочется поблагодарить Н. В. Матвееву за обсуждения и дискуссии, в результате которых сформировались взгляды автора на роль классификации растительности в геоботаническом картографировании. Благодарен коллегам из Лаборатории динамики растительного покрова Арктики за поддержку и помощь при проведении полевых исследований. Глубоко признателен директору заповедника «Ненецкий» С. А. Золотому и его коллективу, а также С. А. Уварову за помощь в организации и проведении экспедиционных работ.

Список литературы

Adegun A. A., Viriri S., Tapamo J. R. 2023. Review of deep learning methods for remote sensing satellite images classification: experimental survey and comparative analysis // Journ. Big Data. V. 10. № 169. P. 1–34. *https://doi.org/10.1186/s40537-023-00772-x*

Ali K., Johnson B.A. 2022. Land-Use and Land-Cover Classification in Semi-Arid Areas from Medium-Resolution Remote-Sensing Imagery: A Deep Learning Approach // Sensors. V. 22. № 22. 8750. *https://doi.org/10.3390/s22228750*

Chachra P., Tiwari A., Kumar M. 2025. A Deep CNN model for Landuse Landcover Classification for 4 Band Visible and NIR Datasets // ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. V. X-5/W2-2025. P. 65–70. *https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-5-W2-2025-65-2025*

David E., Madec S., Sadeghi-Tehran P., Aasen H., Zheng B., Liu S., Kirchgessner N., Ishikawa C., Nagasawa K., Badhon M.A., Pozniak C., de Solan D., Hund A., Chapman S.C., Baret F., Stavness I., Guo W. 2020. Global wheat head detection (gwhd) dataset: A large and diverse dataset of high resolution RGB labelled images to develop and benchmark wheat head detection methods. 16 p. URL: *https://www.researchgate.net/publication/341176067*

[Elsakov] *Елсаков В. В.* 2023. Влияние детальности аэрокосмических изображений на результаты классификации растительных сообществ тундры // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 20. № 1. С. 176–188. *https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-1-176-188*

Flood N., Watson F., Collett L. 2019. Using a U-net convolutional neural network to map woody vegetation extent from high resolution satellite imagery across Queensland, Australia // Intern. Journ. App. Earth Observation and Geoinformation. V. 82. Art. N 101897. *https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101897*

[Geobotanicheskoe…] Геоботаническое районирование Нечерноземья европейской части РСФСР. 1989. Л. 64 с.

Helber P., Bischke B., Dengel A., Borth D. 2019. EuroSATsat: A novel dataset and deep learning benchmark for land use and land cover classification // IEEE Journ. Sel. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens. V. 12. № 7. P. 2217–2226. *https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2918242*

Kattenborn T., Eichel J., Fassnacht F. E. 2019. Convolutional Neural Networks enable efficient, accurate and fine-grained segmentation of plant species and communities from high-resolution UAV imagery // Sci. Rep. V. 9. № 1. P. 1–9. *https://doi.org/10.1038/s41598-019-53797-9*

Kattenborn T., Leitloff J., Schiefer F., Hinz S. 2021. Review on Convolutional Neural Networks (CNN) in vegetation remote sensing // ISPRS Journ. of Photogrammetry and Remote Sensing. V. 173. P. 24–49. *https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.12.010*

Kislov D.E., Korznikov K.A. 2020. Automatic windthrow detection using very-high-resolution satellite imagery and deep learning // Remote Sensing. V. 12. № 7. 1145. *https://doi.org/10.3390/rs12071145*

Kislov D. E., Korznikov K. A., Altman J., Vozmishcheva A. S., Krestov P.V. 2021. Extending deep learning approaches for forest disturbance segmentation on very high-resolution satellite images // Remote Sensing in Ecology and Conservation. V. 7. № 3. P. 355–368. *https://doi.org/10.1002/rse2.194*

[Komarova et al.] *Комарова А. Ф., Куксина Н. В., Зудкин А. Г.* 2016. Картографирование темнохвойных лесов Северо-Западного Кавказа методом нейронных сетей // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 13. № 5. С. 157–166. *https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-5-157-166*

Korznikov K., Kislov D., Petrenko T., Dzizyurova V., Doležal J., Krestov P., Altman J. 2023. Unveiling the Potential of Drone-Borne Optical Imagery in Forest Ecology: A Study on the Recognition and Mapping of Two Evergreen Coniferous Species // Remote Sensing. V. 15. № 18. 4394. *https://doi.org/10.3390/rs15184394*

Korznikov K. A., Kislov D. E., Altman J., Dolezal J., Vozmishcheva A. S., Krestov P. 2021. Using U-Net-Like Deep Convolutional Neural Networks for Precise Tree Recognition in Very High Resolution RGB (Red, Green, Blue) Satellite Images // Forests. V. 12. № 1. 66. *https://doi.org/10.3390/f12010066*

Langford Z., Kumar J., Hoffman F. M., Norby R. J., Wullschleger S. D., Sloan V. L., Iversen C. M. 2016. Mapping Arctic Plant Functional Type Distributions in the Barrow Environmental Observatory Using WorldView-2 and LiDAR Datasets // Remote Sensing. V. 8. № 733. P. 1–24. *http://dx.doi.org/10.3390/rs8090733*

Langford Z. L., Kumar J., Hoffman F. M., Breen A. L., Iversen C. M. 2019. Arctic Vegetation Mapping Using Unsupervised Training Datasets and Convolutional Neural Networks // Remote Sens. V. 11. № 69. P. 1–23. *http://dx.doi.org/10.3390/rs11010069*

[Lavrinenko] *Лавриненко И. А.* 2013. Геоботаническое районирование Большеземельской тундры и прилегающих территорий // Геоботаническое картографирование. СПб.: Изд. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». С. 74–92. *https://doi.org/10.31111/geobotmap/2013.74*

[Lavrinenko] *Лавриненко И. А.* 2020. Типология и синтаксономический состав территориальных единиц растительности: новый подход на примере изучения арктических маршей // Растительность России. № 39. С. 100–148. *https://doi.org/10.31111/vegrus/2020.39.100*

[Lavrinenko, Kochergina] *Лавриненко О. В., Кочергина А. Г.* 2022. Новые ассоциации и высшие синтаксоны ивняков в восточноевропейском секторе Арктики // Растительность России. № 44. С. 97–135. *https://doi.org/10.31111/vegrus/2021.44.97*

[Lavrinenko, Lavrinenko] *Лавриненко О. В., Лавриненко И. А.* 2015. Сообщества класса ***Oxycocco-Sphagnetea*** Br.-Bl. et R. Tx. 1943 в восточноевропейских тундрах // Растительность России. № 26. С. 55–84. *https://doi.org/10.31111/vegrus/2015.26.55*

[Lavrinenko, Lavrinenko] *Лавриненко О. В., Лавриненко И. А.* 2018. Зональная растительность равнинных восточноевропейских тундр // Растительность России. № 32. С. 35–108. *https://doi.org/10.31111/vegrus/2018.32.35*

[Lavrinenko, Lavrinenko] *Лавриненко О. В., Лавриненко И. А.* 2020. Характерные виды высших синтаксонов в равнинных восточноевропейских тундрах // Бот. журн. Т. 105. № 4. С. 315–347. *https://doi.org/10.31857/S0006813620040055*

[Lavrinenko, Lavrinenko] *Лавриненко О. В., Лавриненко И. А.* 2021. Сообщества с кустарниковыми ивами в подзоне типичных тундр восточноевропейского сектора Арктики // Растительность России. № 41. С. 75–112. *https://doi.org/10.31111/vegrus/2021.41.75*

[Lavrinenko et al.] *Лавриненко О. В., Лавриненко И. А., Симонова К. И.* 2024a. Состояние островных ельников в западной части Большеземельской тундры спустя 23 года // Environmental dynamics and global climate change. Т. 15. № 1. С. 30–67. *https://doi.org/10.18822/edgcc629471*

[Lavrinenko et al.] *Лавриненко О. В., Лавриненко И. А., Цывкунова Н. В., Дьячкова Т. В.* 2024b. Водные и прибрежно-водные сообщества в тундрах Ненецкого автономного округа // Растительность России. № 49. С. 88–123. *https://doi.org/10.31111/vegrus/2024.49.88*

[Lavrinenko et al.] *Лавриненко О. В., Матвеева Н. В., Лавриненко И. А.* 2016a. Классификация растительности восточноевропейских тундр: предварительные итоги // Тезисы междунар. науч. конф. «Современные фундаментальные проблемы классификации растительности». Ялта, 4–9 октября 2016 г. Ялта. С. 68–69.

[Lavrinenko et al.] *Лавриненко О. В., Матвеева Н. В., Лавриненко И. А.* 2016b. Сообщества класса ***Scheuchzerio–Caricetea nigrae*** (Nordh. 1936) Tx. 1937 в восточноевропейских тундрах // Растительность России. № 28. С. 55–88. *https://doi.org/10.31111/vegrus/2016.28.55*

Lavrinenko O. V., Braslavskaya T. Yu., Chinenko S. V., Churakova E. Yu., Karsonova D. D., Kopeina E. I., Kotlyarchuk E. A., Razumovskaya A. V., Sidorova O. V., Smirnova M. A. 2026 a. Syntaxonomic diversity of the birch krummholz with *Betula pubescens* var. *pumila* in the north of the European Russia: I. The class ***Vaccinio–Piceetea*** Br.-Bl. in Br.-Bl. et al. 1939 // Botanica Pacifica, in press. *https://doi.org/10.17581/bp.2026.15207*

Лавриненко О. В., Лавриненко И. А., Нешатаев В. В., Котлярчук Е. А., Карсонова Д. Д. 2026 b. Луговая растительность (порядок ***Molinietalia caeruleae*** Koch 1926) субарктических пойм на территории Ненецкого автономного округа // Растительность России. № 54. С. 107–138. *https://doi.org/10.31111/vegrus/2026.54.107*

Lavrinenko O. V., Simonova K. I., Kotlyarchuk E. A., Karsonova D. D., Lavrinenko I. A. 2026 c. Syntaxonomic diversity of the spruce and birch-spruce open woodlands (***Vaccinio–Piceetea***) at the northern boundary of their range in the Nenets Autonomous Area (Russia) // Botanica Pacifica. V. 15. N 1. P. 159–181. *https://doi.org/10.17581/bp.2026.15110*

Lei M., Yu L., Xueliang Z., Yuanxin Y., Gaofei Y., Brian A. J. 2019. Deep learning in remote sensing applications: A meta-analysis and review // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. V. 152. P. 166–177. *https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.04.015*

Macaulay S. O., Maset E., Boscutti F., Cingano P., Trevisan F., Trotta G., Vuerich V., Fusiello A. 2026. Transferring RGB-Pretrained CNNs to Multispectral UAV Imagery for Salt Marsh Vegetation Classification // Remote Sens. Vol. 18. № 4. 655. *https://doi.org/10.3390/rs18040655*

[Matveeva, Lavrinenko] *Матвеева Н. В., Лавриненко О. В.* 2021. Чек-лист синтаксонов Российской Арктики: текущее состояние классификации растительности // Растительность России. № 42. С. 3–41. *https://doi.org/10.31111/vegrus/2021.42.3*

[Moskovchenko] *Московченко М. Д.* 2023. Использование свёрточных нейронных сетей для геопространственного моделирования породной структуры и таксационных характеристик лесов (на примере ХМАО — Югры) // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Т. 20. № 2. С. 75–93. *https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-2-75-93*

Mohanty S.P., Hughes D.P., Salathé M. 2016. Using Deep Learning for Image-Based Plant Disease Detection // Front. Plant Sci. V. 7. 1419. P. 1–10. *https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01419*

Olofsson P., Foody G. M., Herold M., Stehman S. V., Woodcock C. E., Wulder M. A. 2014. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change // Remote Sensing of Environment. V. 148. P. 42–57. *https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015*

Scepanovic S., Antropov O., Laurila P., Rauste Y., Ignatenko V., Praks J. 2021. Wide-area land cover mapping with Sentinel-1 imagery using deep learning semantic segmentation models // IEEE J. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. V. 14. P. 10357–10374. *https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3116094*

[Schmithusen] *Шмитхюзен И.* 1966. Общая география растительности. М. 1966. 311 с.

[Sinel'nikova et al.] *Синельникова Н. В., Лавриненко О. В., Секретарёва Н. А*. 2026. ***Hylocomio splendentis–Salicetea glaucae*** – новый класс тундровой кустарниковой растительности // Разнообразие растительного мира. № 1 (28). С. 56–81. *https://doi.org/10.22281/2686-9713-2026-1-56-81*

Sotomayor L. N., Lucieer A., Turner D., Lewis M., Kattenborn T. 2025. Mapping fractional vegetation cover in UAS RGB and multispectral imagery in semi-arid Australian ecosystems using CNN-based semantic segmentation // Landsc Ecol. V. 40. 169. *https://doi.org/10.1007/s10980-025-02193-y*

Theurillat J.-P., Willner W., Fernández-González F., Bültmann H., Čarni A., Gigante D., Mucina L., Weber H. E. 2021. International Code of Phytosociological Nomenclature. 4th ed. // Appl. Veg. Sci. V. 24. e12491. *https://doi.org/10.1111/avsc.12491*

[Vegetation…] Классификация растительности России 2025. Отв. ред. Н. Б. Ермаков, О. В. Морозова, П. В. Крестов, Ю. В. Плугатарь. Т. I. Растительность полярных пустынь, тундр, альпийского пояса, скал, осыпей, приснежных, водных и околоводных местообитаний, безлесных и слабо облесённых болот / Ред. О. В. Морозова, О. В. Лавриненко, Ю. А. Семенищенков. М.: Медиа-ПРЕСС. 616 с.

[Vegetation…] Классификация растительности России. 2026. Отв. ред. Н. Б. Ермаков, О. В. Морозова, П. В. Крестов, Ю. В. Плугатарь. Т. II. Лесная, кустарниковая и древесно-кустарниковая зональная и интразональная растительность, криволесья, сообщества бриофитов, лишайников, водорослей и цианобактерий / Ред. О. В. Морозова, О. В. Лавриненко, Ю. А. Семенищенков. М.: Медиа-ПРЕСС. 732 с.

Wagner F. H., Sanchez A., Aidar M. P. M., Rochelle A. L. C., Tarabalka Y., Fonseca M. G., Phillips O. L., Gloor E., Aragao L. 2020. Mapping Atlantic rainforest degradation and regeneration history with indicator species using convolutional network // Plos One. V. 15. № 2. P. 1–24. *https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229448*

Watanabe S., Sumi K., Ise T. 2020. Identifying the vegetation type in Google Earth images using a convolutional neural network: a case study for Japanese bamboo forests // BMC Ecology. V. 20. № 65. P. 1–4. *https://doi.org/10.1186/s12898-020-00331-5*

References

Adegun A. A., Viriri S., Tapamo J. R. 2023. Review of deep learning methods for remote sensing satellite images classification: experimental survey and comparative analysis // Journ. Big Data. V. 10. № 169. P. 1–34. *https://doi.org/10.1186/s40537-023-00772-x*

Ali K., Johnson B.A. 2022. Land-Use and Land-Cover Classification in Semi-Arid Areas from Medium-Resolution Remote-Sensing Imagery: A Deep Learning Approach // Sensors. V. 22. № 22. 8750. *https://doi.org/10.3390/s22228750*

Chachra P., Tiwari A., Kumar M. 2025. A Deep CNN model for Landuse Landcover Classification for 4 Band Visible and NIR Datasets // ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci. V. X-5/W2-2025. P. 65–70. *https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-5-W2-2025-65-2025*

David E., Madec S., Sadeghi-Tehran P., Aasen H., Zheng B., Liu S., Kirchgessner N., Ishikawa C., Nagasawa K., Badhon M.A., Pozniak C., de Solan D., Hund A., Chapman S.C., Baret F., Stavness I., Guo W. 2020. Global wheat head detection (gwhd) dataset: A large and diverse dataset of high resolution RGB labelled images to develop and benchmark wheat head detection methods. 16 p. URL: *https://www.researchgate.net/publication/341176067*

Elsakov V. V. 2023. Vliianie detal'nosti aerokosmicheskikh izobrazhenii na rezul'taty klassifikatsii rastitel'nykh soobshchestv tundry [Influence of detail of aerospace images on the results of classification of tundra plant communities] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the Earth from space]. V. 20. № 1. P. 176–188. *https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-1-176-188* (*In Russian*)

Flood N., Watson F., Collett L. 2019. Using a U-net convolutional neural network to map woody vegetation extent from high resolution satellite imagery across Queensland, Australia // Intern. J. Applied Earth Observation and Geoinformation. V. 82. Art. N. 101897. *https://doi.org/10.1016/j.jag.2019.101897*

Geobotanicheskoe raionirovanie Nechernozem'ia evropeiskoi chasti RSFSR [Geobotanical zoning of the Non-Chernozem zone of the European part of the RSFSR]. 1989. Leningrad. 64 p. (*In Russian*)

Helber P., Bischke B., Dengel A., Borth D. 2019. EuroSATsat: A novel dataset and deep learning benchmark for land use and land cover classification // IEEE J. Sel. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens. V. 12. № 7. P. 2217–2226. *https://doi.org/10.1109/JSTARS.2019.2918242*

Kattenborn T., Eichel J., Fassnacht F. E. 2019. Convolutional Neural Networks enable efficient, accurate and fine-grained segmentation of plant species and communities from high-resolution UAV imagery // Sci. Rep. V. 9. № 1. P. 1–9. *https://doi.org/10.1038/s41598-019-53797-9*

Kattenborn T., Leitloff J., Schiefer F., Hinz S. 2021. Review on Convolutional Neural Networks (CNN) in vegetation remote sensing // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. V. 173. P. 24–49. *https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.12.010*

Kislov D. E., Korznikov K. A. 2020. Automatic windthrow detection using very-high-resolution satellite imagery and deep learning // Remote Sensing. V. 12. № 7. 1145. *https://doi.org/10.3390/rs12071145*

Kislov D.E., Korznikov K.A., Altman J., Vozmishcheva A.S., Krestov P.V. 2021. Extending deep learning approaches for forest disturbance segmentation on very high-resolution satellite images // Remote Sensing in Ecology and Conservation. V. 7. № 3. P. 355–368. *https://doi.org/10.1002/rse2.194*

Komarova A.F., Kuksina N.V., Zudkin A.G. 2016. Kartografirovanie temnokhvoinykh lesov Severo-Zapadnogo Kavkaza metodom neironnykh setei [Mapping of dark coniferous forests of the Northwestern Caucasus using neural network methods] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa [Current problems in remote sensing of the Earth from space]. V. 13. № 5. P. 157–166. *https://doi.org/10.21046/2070-7401-2016-13-5-157-166* (*In Russian*)

Korznikov K., Kislov D., Petrenko T., Dzizyurova V., Doležal J., Krestov P., Altman J. 2023. Unveiling the Potential of Drone-Borne Optical Imagery in Forest Ecology: A Study on the Recognition and Mapping of Two Evergreen Coniferous Species // Remote Sensing. V. 15. № 18. 4394. *https://doi.org/10.3390/rs15184394*

Korznikov K. A., Kislov D. E., Altman J., Dolezal J., Vozmishcheva A. S., Krestov P. 2021. Using U-Net-Like Deep Convolutional Neural Networks for Precise Tree Recognition in Very High Resolution RGB (Red, Green, Blue) Satellite Images // Forests. V. 12. № 1. 66. *https://doi.org/10.3390/f12010066*

Langford Z., Kumar J., Hoffman F. M., Norby R. J., Wullschleger S. D., Sloan V. L., Iversen C. M. 2016. Mapping Arctic Plant Functional Type Distributions in the Barrow Environmental Observatory Using WorldView-2 and LiDAR Datasets // Remote Sensing. V. 8. № 733. P. 1–24. *http://dx.doi.org/10.3390/rs8090733*

Langford Z. L., Kumar J., Hoffman F. M., Breen A. L., Iversen C. M. 2019. Arctic Vegetation Mapping Using Unsupervised Training Datasets and Convolutional Neural Networks // Remote Sens. V. 11. № 69. P. 1–23. *http://dx.doi.org/10.3390/rs11010069*

Lavrinenko I. A. 2013. Geobotanicheskoe raionirovanie Bol'shezemel'skoi tundry i prilegaiushchikh territorii [Geobotanical zoning of the Bolshezemelskaya tundra and adjacent territories] // Geobotanicheskoe kartografirovanie [Geobotanical mapping]. St. Petersburg: Izd. SPbGETU «LETI». P. 74–92. *https://doi.org/10.31111/geobotmap/2013.74* (*In Russian*)

Lavrinenko I. A. 2020. Tipologiia i sintaksonomicheskii sostav territorial'nykh edinits rastitel'nosti: novyi podkhod na primere izucheniia arkticheskikh marshei [Typology and syntaxonomic composition of territorial vegetation units: a new approach based on the study of Arctic marshes] // Rastitel'nost' Rossii. № 39. P. 100–148. *https://doi.org/10.31111/vegrus/2020.39.100* (*In Russian*)

Lavrinenko O. V., Kochergina A. G. 2022. Novye assotsiatsii i vysshie sintaksony ivniakov v vostochnoevropeiskom sektore Arktiki [New associations and higher syntaxa of willow scrubs in the East European sector of the Arctic] // Rastitel'nost' Rossii. № 44. P. 97–135. *https://doi.org/10.31111/vegrus/2021.44.97* (*In Russian*)

Lavrinenko O. V., Lavrinenko I. A. 2015. Soobshchestva klassa ***Oxycocco–Sphagnetea*** Br.-Bl. et R. Tx. 1943 v vostochnoevropeiskikh tundrakh [Communities of the class ***Oxycocco–Sphagnetea*** Br.-Bl. et R. Tx. 1943 in the East European tundras] // Rastitel'nost' Rossii. № 26. P. 55–84. *https://doi.org/10.31111/vegrus/2015.26.55* (*In Russian*)

Lavrinenko O. V., Lavrinenko I. A. 2018. Zonal'naia rastitel'nost' ravninnykh vostochnoevropeiskikh tundr [Zonal vegetation of the plain East European tundras] // Rastitel'nost' Rossii. № 32. P. 35–108. *https://doi.org/10.31111/vegrus/2018.32.35* (*In Russian*)

Lavrinenko O. V., Lavrinenko I. A. 2020. Kharakternye vidy vysshikh sintaksonov v ravninnykh vostochnoevropeiskikh tundrakh [Characteristic species of higher syntaxa in the plain East European tundras] // Bot. zhurn. V. 105. № 4. P. 315–347. *https://doi.org/10.31857/S0006813620040055* (In Russian)

Lavrinenko O. V., Lavrinenko I. A. 2021. Soobshchestva s kustarnikovymi ivami v podzone tipichnykh tundr vostochnoevropeiskogo sektora Arktiki [Communities with shrub willows in the typical tundra subzone of the Eastern European sector of the Arctic] // Rastitel'nost' Rossii. № 41. P. 75–112. *https://doi.org/10.31111/vegrus/2021.41.75* (*In Russian*)

Lavrinenko O. V., Lavrinenko I. A., Neshataev V. V. 2025a. Meadows and meadow-like communities on valley and hillsides in the tundra zone: new associations and alliance in the class ***Mulgedio–Aconitetea*** // Botanica Pacifica. V. 14. № 1. P. 115–143. *https://doi.org/10.17581/bp.2025.14115*

Lavrinenko O. V., Lavrinenko I. A., Neshataev V. V. 2025b. Additions to the syntaxonomy of the tundra classes ***Matricario–Poetea arcticae*** and ***Carici arctisibiricae–Hylocomietea alaskani*** // Botanica Pacifica. V. 14. № 2. *https://doi.org/10.17581/bp.2025.14206*

Lavrinenko O. V., Lavrinenko I. A., Simonova K. I. 2024a. State of island spruce forests in the western part of the Bolshezemelskaya tundra after 23 years // Environmental dynamics and global climate change. V. 15. № 1. P. 30–67. *https://doi.org/10.18822/edgcc629471*

Lavrinenko O. V., Lavrinenko I. A., Tsyvkunova N. V., Dyachkova T. V. 2024b. Vodnye i pribrezhno-vodnye soobshchestva v tundrakh Nenetskogo avtonomnogo okruga [Aquatic and coastal aquatic communities in the tundras of the Nenets Autonomous Okrug] // Rastitel'nost' Rossii. № 49. P. 88–123. *https://doi.org/10.31111/vegrus/2024.49.88* (*In Russian*)

Lavrinenko O. V., Matveeva N. V., Lavrinenko I. A. 2016a. Klassifikatsiia rastitel'nosti vostochnoevropeiskikh tundr: predvaritel'nye itogi [Classification of vegetation of the East European tundras: preliminary results] // Tezisy mezhdunarodnoi nauchnoi konferentsii «Sovremennye fundamental'nye problemy klassifikatsii rastitel'nosti». Yalta, 4–9 October 2016. Yalta. P. 68–69. (*In Russian*)

Lavrinenko O. V., Matveeva N. V., Lavrinenko I. A. 2016b. Soobshchestva klassa ***Scheuchzerio–Caricetea nigrae*** (Nordh. 1936) Tx. 1937 v vostochnoevropeiskikh tundrakh [Communities of the class ***Scheuchzerio–Caricetea nigrae*** (Nordh. 1936) Tx. 1937 in the East European tundras] // Rastitel'nost' Rossii. № 28. P. 55–88. *https://doi.org/10.31111/vegrus/2016.28.55* (*In Russian*)

Lavrinenko O. V., Simonova K. I., Kotlyarchuk E. S., Karsonova D. D., Lavrinenko I. A. 2026 a. Syntaxonomic diversity of the spruce and birch-spruce open woodlands (***Vaccinio–Piceetea***) at the northern boundary of their range in the Nenets Autonomous Area (Russia) // Botanica Pacifica. V. 15. № 1. P. 159–181. *https://doi.org/10.17581/bp.2026.15110*

Lavrinenko O. V., Braslavskaya T. Yu., Chinenko S. V., Churakova E. Yu., Karsonova D. D., Kopeina E. I., Kotlyarchuk E. A., Razumovskaya A. V., Sidorova O. V., Smirnova M. A. 2026 b. Syntaxonomic diversity of the birch krummholz with *Betula pubescens* var. *pumila* in the north of the European Russia: I. The class ***Vaccinio–Piceetea*** Br.-Bl. in Br.-Bl. et al. 1939 // Botanica Pacifica, in press. *https://doi.org/10.17581/bp.2026.15207*

Lavrinenko O. V., Lavrinenko I. A., Neshataev V. V., Kotlyarchuk E. A., Karsonova D. D. 2026 c. Meadow vegetation (order Molinietalia caeruleae Koch 1926) of the subarctic floodplains in the Nenets Autonomous Area // Rastitel'nost' Rossii. № 54. P. 107–138. (In Russian) *https://doi.org/10.31111/vegrus/2026.54.107*

Lei M., Yu L., Xueliang Z., Yuanxin Y., Gaofei Y., Brian A. J. 2019. Deep learning in remote sensing applications: A meta-analysis and review // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. V. 152. P. 166–177. *https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2019.04.015*

Macaulay S. O., Maset E., Boscutti F., Cingano P., Trevisan F., Trotta G., Vuerich V., Fusiello A. 2026. Transferring RGB-Pretrained CNNs to Multispectral UAV Imagery for Salt Marsh Vegetation Classification // Remote Sens. V. 18. № 4. 655. *https://doi.org/10.3390/rs18040655*

Matveeva N. V., Lavrinenko O. V. 2021. Chek-list sintaksonov Rossiiskoi Arktiki: tekushchee sostoianie klassifikatsii rastitel'nosti [Checklist of syntaxa of the Russian Arctic: current state of vegetation classification] // Rastitel'nost' Rossii. № 42. P. 3–41. *https://doi.org/10.31111/vegrus/2021.42.3* (*In Russian*)

Moskovchenko M.D. 2023. Ispol'zovanie svertochnykh neironnykh setei dlya geoprostranstvennogo modelirovaniya porodnoi struktury i taksatsionnykh kharakteristik lesov (na primere KhMAO — Yugry) [Using convolutional neural networks for geospatial modeling of forest stand structure and inventory characteristics (case study of Khanty-Mansi Autonomous Okrug – Yugra)] // Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniia Zemli iz kosmosa. V. 20. № 2. P. 75–93. *https://doi.org/10.21046/2070-7401-2023-20-2-75-93* (*In Russian*)

Mohanty S. P., Hughes D. P., Salathé M. 2016. Using Deep Learning for Image-Based Plant Disease Detection // Front. Plant Sci. V. 7. 1419. P. 1–10. *https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01419*

Olofsson P., Foody G. M., Herold M., Stehman S. V., Woodcock C. E., Wulder M. A. 2014. Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change // Remote Sensing of Environment. V. 148. P. 42–57. *https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015*

Scepanovic S., Antropov O., Laurila P., Rauste Y., Ignatenko V., Praks J. 2021. Wide-area land cover mapping with Sentinel-1 imagery using deep learning semantic segmentation models // IEEE Journ. Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing. V. 14. P. 10357–10374. *https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3116094*

Schmithusen J. 1966. Obshchaia geografiia rastitel'nosti [General geography of vegetation]. Moscow. 1966. 311 p.

Sinelnikova N.V., Lavrinenko O.V., Sekretareva N.A. 2026. ***Hylocomio splendentis–Salicetea glaucae*** – novyi klass tundrovoi kustarnikovoi rastitel'nosti [***Hylocomio splendentis–Salicetea glaucae*** – a new class of tundra shrub vegetation] // Raznoobrazie rastitel'nogo mira. № 1 (28). P. 56–81. *https://doi.org/10.22281/2686-9713-2026-1-56-81* (*In Russian*)

Sotomayor L. N., Lucieer A., Turner D., Lewis M., Kattenborn T. 2025. Mapping fractional vegetation cover in UAS RGB and multispectral imagery in semi-arid Australian ecosystems using CNN-based semantic segmentation // Landsc Ecol. V. 40. 169. *https://doi.org/10.1007/s10980-025-02193-y*

Theurillat J.-P., Willner W., Fernández-González F., Bültmann H., Čarni A., Gigante D., Mucina L., Weber H. E. 2021. International Code of Phytosociological Nomenclature. 4th edition // Applied Vegetation Science. V. 24. e12491. *https://doi.org/10.1111/avsc.12491*

Vegetation Classification of Russia. 2025. Editors-in-Chief N. B. Ermakov, O. V. Morozova, P. V. Krestov, Yu. V. Plugatar. V. I. Vegetation of the polar desert, tundra, alpine belt, rocks, screes, near snow, aquatic and coastal-water habitats, non- and poorly forested bogs / Eds. O. V. Morozova, O. V. Lavrinenko, Yu. A. Semenishchenkov. Moscow: Media-PRESS. 616 p. (*In Russian*)

Vegetation Classification of Russia. 2026. Editors-in-Chief N. B. Ermakov, O. V. Morozova, P. V. Krestov, Yu. V. Plugatar. V. II. Vegetation of forests, shrubs and tree-shrub zonal and intrazonal communities, krummholz, communities of bryophytes, lichens, algae and cyanobacteria / Eds. O. V. Morozova, O. V. Lavrinenko, Yu. A. Semenishchenkov. Moscow: Media-PRESS. 732 p. (*In Russian*)

Wagner F. H., Sanchez A., Aidar M. P. M., Rochelle A. L. C., Tarabalka Y., Fonseca M. G., Phillips O. L., Gloor E., Aragao L. 2020. Mapping Atlantic rainforest degradation and regeneration history with indicator species using convolutional network // Plos One. V. 15. № 2. P. 1–24. *https://doi.org/10.1371/journal.pone.0229448*

Watanabe S., Sumi K., Ise T. 2020. Identifying the vegetation type in Google Earth images using a convolutional neural network: a case study for Japanese bamboo forests // BMC Ecology. V. 20. № 65. P. 1–4. *https://doi.org/10.1186/s12898-020-00331-5*

Сведения об авторах

Лавриненко Игорь Анатольевич
к. б. н., заведующий Лабораторией динамики растительного покрова Арктики
ФГБУН Ботанический институт им. В. Л. Комарова РАН, Санкт-Петербург
E-mail: lavrinenkoi@mail.ru

Lavrinenko Igor Anatol'evich
Ph. D. in Biological Sciences, Head of laboratory of the dynamics of the Arctic vegetation cover
Komarov Botanical Institute RAS, St. Petersburg
E-mail: lavrinenkoi@mail.ru