

УДК: 911.2+574.9

DOI: 10.35595/2414-9179-2023-1-29-20-33

А.А. Высоцкая¹, А.А. Медведков^{1,2}

ИНФОРМАЦИОННЫЕ РЕСУРСЫ ДЛЯ ОЦЕНКИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО ПОТЕНЦИАЛА ГЕОСИСТЕМ (НА ПРИМЕРЕ ТЕРРИТОРИИ ЕНИСЕЙСКОГО СЕВЕРА)

АННОТАЦИЯ

Рассмотрен опыт использования открытых данных для создания тематических карт на территорию Енисейской Сибири по важнейшим компонентам экологической оценки ландшафтов. Оценка экологически значимых свойств ландшафтов, раскрывающих их средозащитную роль, является основой для обоснования охраны природы и этноэкосистем в условиях нарастающего антропогенного воздействия. В связи с этим обсуждаются возможности использования геопространственных данных для решения задач подобного типа в бореальной криолитозоне (на примере территории Енисейской Сибири). Для реализации этой цели, принимая во внимание доступность открытых данных, выбраны наиболее информативные показатели (сплошность и температура многолетней мерзлоты, чистая первичная продукция, поток скрытого тепла, однородность среды обитания растений и животных), характеризующие экологически значимые свойства ландшафта. Характеристики сплошности многолетней мерзлоты определяют не только инерционность состояния мерзлотных ландшафтов при внешних воздействиях, но и потенциал активности криогенных процессов, а температура мерзлых пород — характер отклика мерзлотных геосистем на климатические воздействия. Средозащитный потенциал ландшафтов оценивается с использованием совокупного учета показателей чистой первичной продукции и потока скрытого тепла. Биопродукционные характеристики позволяют сравнивать территории по степени их уязвимости к внешним воздействиям и способности к восстановлению. Рассчитанные значения потока скрытого тепла в значительной степени индицируют гомеостатическую функцию лесов. Однородность среды обитания растений и животных рассмотрена в качестве косвенного показателя разнообразия природно-ресурсных условий для традиционного природопользования. Картографирование геоэкологических условий произведено с использованием векторных данных, представленных в информационной системе «Земельные ресурсы России». Для создания карт чистой первичной продукции и потоков скрытого тепла использовались обработанные данные спектрорадиометра MODIS. Картографирование однородности биогеоценотических условий произведено по результатам расчета статистических закономерностей в распределении улучшенного вегетационного индекса (EVI) из базы данных «Global Habitat Heterogeneity». Рассмотрены результаты сопоставления однородности биогеоценотических условий с геоморфологическими особенностями исследуемого региона. Показана противоречивость выводов, полученных исключительно на основе анализа геопространственных данных без привлечения результатов полевых исследований. Обсуждаются сложности использования геопространственных данных для

¹ Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Географический факультет, Ленинские горы, д. 1, Москва, Россия, 119991, *e-mail*: an.vys@yandex.ru; a-medvedkov@bk.ru

² Институт географии РАН, Старомонетный переулоч, д. 29с4, Москва, Россия, 119017, *e-mail*: a-medvedkov@bk.ru

ландшафтно-экологического анализа территорий с ярусным строением рельефа (Среднесибирское плоскогорье, Енисейский кряж и др.).

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: экологические функции лесных ландшафтов, чистая первичная продукция, поток скрытого тепла, однородность местообитаний растений и животных, картографирование ландшафтов

Anna A. Vysotskaya¹, Alexey A. Medvedkov^{1,2}

**INFORMATION RESOURCES FOR ASSESSING
THE ENVIRONMENTAL POTENTIAL OF GEOSYSTEMS
(ON THE EXAMPLE OF THE TERRITORY OF THE YENISEI NORTH)**

ABSTRACT

The experience of using open data to create thematic maps for the territory of the Yenisey Siberia on the most important components of the ecological assessment of landscapes is considered. An assessment of the ecologically significant properties of landscapes, revealing their environmental role, is the basis for substantiating the protection of nature and ethnoecosystems in the face of increasing anthropogenic impact. In this regard, the possibilities of using geospatial data for solving problems of this type in the boreal cryolithozone (on the example of the territory of the Yenisei Siberia) are discussed. To achieve this goal, taking into account the availability of open data, the most informative indicators (continuity and temperature of permafrost, net primary production, latent heat flux, uniformity of the habitat of plants and animals) characterizing the ecologically significant properties of the landscape were selected. The permafrost continuity characteristics determine not only the inertia of the state of permafrost landscapes under external influences, but also the potential for the activity of cryogenic processes. The temperature of frozen rocks diagnoses the nature of the response of permafrost geosystems to climatic influences. The environmental protection potential of landscapes is estimated using the combined accounting of net primary production and latent heat flux. Bioproduction characteristics make it possible to compare territories in terms of their vulnerability to external influences and their ability to recover. The calculated values of the latent heat flux largely indicate the homeostatic function of forests. The homogeneity of the habitat of plants and animals is considered as an indirect indicator of the diversity of natural resource conditions for traditional nature management. Mapping of geocryological conditions was made using vector data presented in the information system "Land Resources of Russia". Processed data from the MODIS spectroradiometer were used to create maps of net primary production and latent heat fluxes. Mapping of the homogeneity of biogeocenotic conditions was made based on the results of calculating statistical patterns in the distribution of the improved vegetation index (EVI) from the Global Habitat Heterogeneity database. The results of comparing the homogeneity of biogeocenotic conditions with the geomorphological features of the region under study are considered. The inconsistency of the conclusions obtained solely on the basis of the analysis of geospatial data without involving the results of field studies is shown. The difficulties of using geospatial data for landscape-ecological analysis of territories with a layered relief structure (the Central Siberian Plateau, the Yenisei Ridge, etc.) are discussed.

¹ Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia, e-mail: an.vys@yandex.ru, a-medvedkov@bk.ru

² Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, 29s4, Staromonetny ln., Moscow, 119017, Russia, e-mail: a-medvedkov@bk.ru

KEYWORDS: ecological functions of forest landscapes, net primary production, latent heat flux, homogeneity of plant and animal habitats, landscape mapping

ВВЕДЕНИЕ

Экологический потенциал ландшафта — одно из центральных понятий современной геоэкологии, которое в своей основе опирается на существующие разработки комплексной физической географии и ландшафтоведения. Вместе с тем необходимо отметить, что, несмотря на произведенное обоснование сущности данного понятия [Исаченко, 2001], в теоретическом отношении оно все еще находится в стадии становления. А.Г. Исаченко [2001] показал, что экологически значимые свойства геосистем находятся в зависимости от показателей тепло- и влагообеспеченности, которые использованы им для проведения сравнительной оценки экологического потенциала зональных ландшафтов России. Представляется, что на каждом иерархическом уровне (макрорегиональный, региональный, локальный) могут быть выделены свои критерии для оценки экологического потенциала ландшафтов.

По-видимому, экологический потенциал ландшафта следует рассматривать как концепцию, в рамках которой могут создаваться и совершенствоваться методики управления качеством окружающей среды, отличающиеся по своей направленности. Как справедливо отмечает И.Н. Владимиров [2019]: «подход к оценке экологического потенциала ландшафтов зависит от цели исследований». Это может быть как социально-экологический подход, ориентированный на оценку влияния окружающей среды на человека, его качество жизни и хозяйственную деятельность, так и природно-экологический, но в этом случае должны быть другие компоненты оценки, базирующиеся на свойствах геосистем. В данном случае, учитывая специфику рассматриваемой территории (Енисейский Север), которая является частью экологического каркаса Северной Евразии, и принимая во внимание ресурсно-промысловое значение таежных ландшафтов, мы будем ориентироваться на природно-экологический подход.

В условиях увеличения темпов потепления климата и интенсификации антропогенного воздействия в криолитозоне (в т. ч. в Сибирской Арктике, к которой относится Енисейский Север), необходима актуальная информация о важнейших экологических свойствах ландшафтов и их ранжировании, что должно быть положено в основу обеспечения охраны природы и экологической безопасности. Особую важность это могло бы иметь для территорий традиционного природопользования, поскольку позволило бы отстоять от горнопромышленного освоения наиболее продуктивные участки сибирской тайги, обосновав их значимость с позиции регулирующих (в т. ч. противопожарных) и обеспечивающих функций ландшафта.

Цель данной статьи — анализ возможностей использования наиболее информативных показателей, полученных с применением открытых данных для оценки (в т. ч. и картографирования) экологических свойств таежных ландшафтов, которые в совокупности и формируют их экологический потенциал.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

С использованием открытых данных (табл. 1), обработка которых производилась в ГИС-пакете Arc.Map 10.5, на территорию Енисейской Сибири создана серия карт (рис. 1–5), иллюстрирующих пространственную дифференциацию информативных характеристик (сплошность и температура многолетней мерзлоты, чистая первичная продукция, поток скрытого тепла и однородность местообитаний растений и животных), выступающих в качестве основных составляющих оценки экологического потенциала геосистем на региональном уровне.

Табл. 1. Базы открытых данных по ключевым параметрам оценки экологического потенциала геосистем бореальной криолитозоны
 Table 1. Open data bases on key parameters for assessing the ecological potential of boreal cryolithozone geosystems

Фактор	Источник	Описание
Сплошность и температура многолетней мерзлоты	CD-ROM «Land Resources of Russia», ИАASA, РАН, 2002 ¹	Данные представлены в векторном формате на всю территорию России в информационной системе «Земельные ресурсы России»
Чистая первичная продукция	Данные спектрорадиометра MODIS: продукт MOD17A3HGFv061* [Running, Zhao, 2021]	Представлены растровые данные годовых значений чистой первичной продукции (NPP) с 500-метровым разрешением. Эти данные получены путем суммирования 8-дневных композитов NPP. NPP рассчитывается как разность между валовой первичной продукцией (GPP) и потерями на дыхание (MR) и измеряется в кгС/м ² . Данные о GPP вычисляются на основе значений других продуктов MODIS: доли поглощаемой фотосинтетически активной радиации (FPAR — MOD15) и независимой оценки потока фотосинтетически активной радиации (PAR) по данным наземных наблюдений. Потери на дыхание (MR) оцениваются по аллометрическому соотношению между индексом листовой поверхности (LAI — MOD15) и приростом тканей растений, которое отличается для разных типов растительного покрова (по данным Land Cover, MOD12)
Поток скрытого тепла	Данные спектрорадиометра MODIS: продукт MOD16A3GFv061*. [Running et al., 2021]	Представлены растровые данные с 500-метровым разрешением, являющиеся средним суточным значением потока скрытого тепла (LE) за каждый год. LE рассчитывается на основе уравнения Пенмана-Монтейна с использованием других продуктов MODIS: Land Cover (MOD12), LAI (MOD15), альbedo (MCD43C3), FPAR (MOD15) и данных наземных метеорологических наблюдений. Единицы измерения Дж/м ² •день. Помимо LE (потенциального и фактического), продукт включает также слой эвапотранспирации ET (потенциальной и фактической, суммированной за год)
Однородность среды обитания растений и животных	Набор данных о разнообразии местообитаний на земной поверхности ² [Tuanmu, Jetz, 2015]	Растровые данные, характеризующие разнообразие местообитаний, представленные в базе данных «Global Habitat Heterogeneity». Всего в данной базе представлено 14 метрик с разрешением 1 км, 5 км и 25 км. Это набор формальных показателей/метрик в форме статистических различий между значениями соседних пикселей растров улучшенного вегетационного индекса (EVI), полученного по усредненным за 5 лет (2001–2005 гг.) данным MODIS (MOD13Q1 v.5 с 250-метровым разрешением). Из 14 показателей была выбрана метрика «однородность» (Homogeneity) с разрешением 1 км, рекомендуемая авторами [Tuanmu, Walter, 2015] как наиболее из них универсальная.

* Данные загружались с использованием сервиса Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples (AppEARS). Электронный ресурс: <https://lpdaac.usgs.gov/tools/appeears/>, позволяющего для выбора данных использовать шейп-файл с границами исследуемого региона (Енисейской Сибири)

¹ Land Resources of Russia. CD-ROM. ИАASA, РАН, 2002. Электронный ресурс: https://webarchive.iiasa.ac.at/Research/FOR/russia_cd/guide.htm (дата обращения 30.09.2022)

² Global Habitat Heterogeneity. Электронный ресурс: <https://www.earthenv.org/texture> (дата обращения 27.09.2022)

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Принимая во внимание доступность открытых данных и их индицирующее значение, нами выбраны информативные показатели, характеризующие экологически значимые свойства ландшафтов, о которых будет сказано ниже.

Карта многолетнемерзлых пород (ММП). Для создания карты (рис. 1) на исследуемую территорию использовались данные о сплошности и температуре ММП — наиболее статичных геокриологических параметрах, представленных в тематическом разделе «Природные условия: мерзлота» информационной системы «Земельные ресурсы России» («Land Resources of Russia»), разработанной учреждениями РАН и Международным институтом прикладного системного анализа (МИПСА).

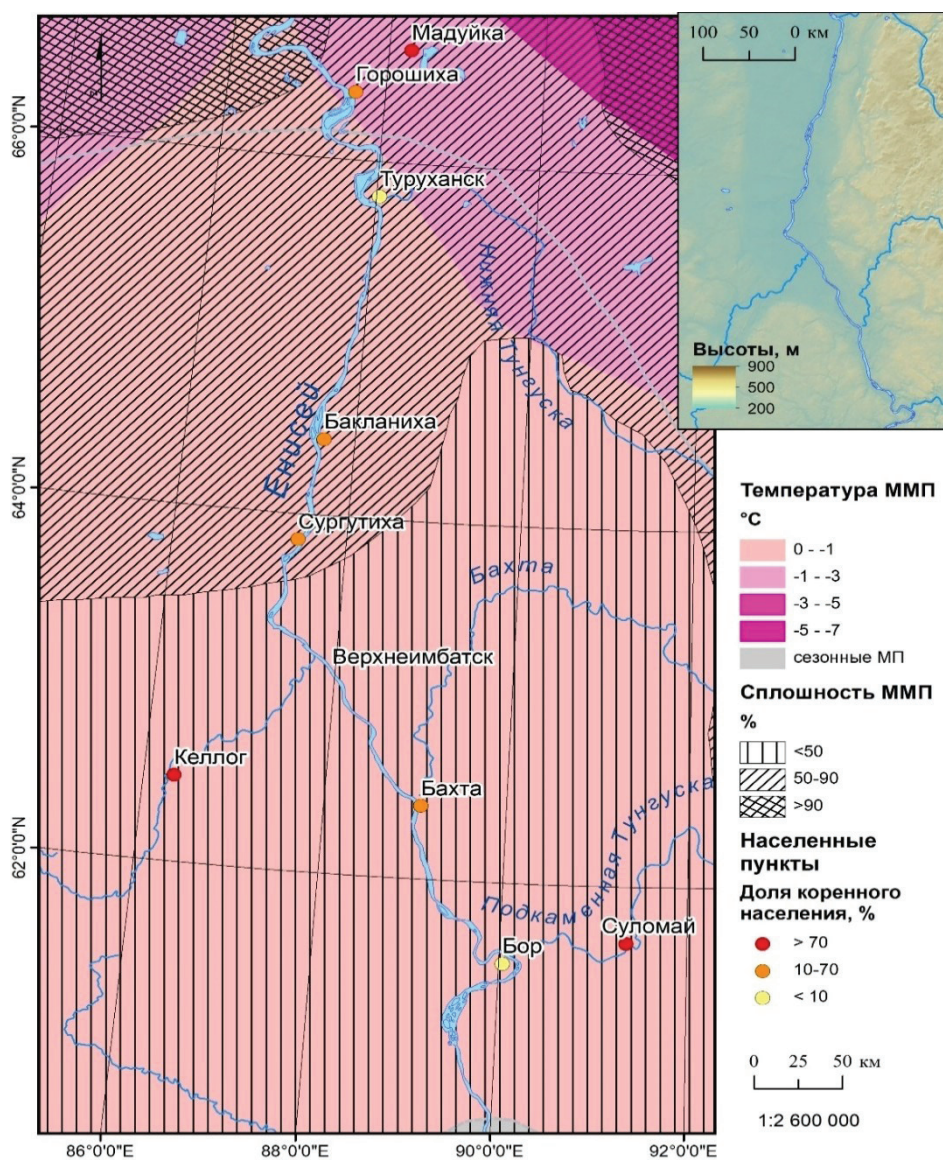


Рис. 1. Геокриологические условия Енисейского Севера
Fig. 1. Geocryological conditions of the Yenisei North

Информационно-тематическое наполнение упомянутого раздела базируется на содержании мелкомасштабных карт из Атласа снежно-ледовых ресурсов мира [1997], исходными данными при составлении которых послужили картографические материалы

более крупного масштаба, а также фактические данные о подземном оледенении и выявленные геокриологические закономерности [Корейша, Соколов, 1992].

Характеристики сплошности многолетней мерзлоты определяют не только инерционность состояния мерзлотных ландшафтов при внешних воздействиях, но и потенциал активности криогенных процессов, тогда как температура мерзлых пород — характер отклика мерзлотных геосистем на климатические воздействия.

Для оценки экологического потенциала геосистем рассматриваемой территории важное значение также имеет южная граница максимального четвертичного оледенения, имевшего, как в основном считается, среднеплейстоценовый возраст. Его граница на представленной карте (рис. 1) проведена по данным В.И. Астахова [2019]. Значимость упомянутого природного рубежа объясняется влиянием состава четвертичных отложений на геокриологические условия изучаемого региона. Так, по данным полевых исследований, охвативших территории в бассейнах рр. Столбовая (Центральносибирский государственный биосферный заповедник) и Большая Черная (родовые угодья суломайских кетов) выявлено, что в ледниковой зоне, т. е. той, которая перекрывалась покровным оледенением, мерзлотные ландшафты получили сегодня более широкое развитие, тогда как южнее упомянутой границы они значительно менее распространены [Горшков и др., 1998; Медведков, 2016 (б)]. Имеющиеся данные свидетельствуют о существующем дефиците инженерно-геологической информации и ее составляющих, что для картографирования мерзлотных ландшафтов имеет принципиальное значение. Данное обстоятельство весьма значимо, учитывая существующую приуроченность мерзлых пород южной криолитозоны к определенным литологическим условиям, в основном к покровам дисперсных отложений [Втюрин, 1975].

Карта чистой первичной продукции. Для создания названной карты (рис. 2) использовались исходные данные, представляющие собой растры с 500-метровым разрешением годовой суммы значений чистой первичной продукции — т. е. той части валовой органической продукции, которая не была израсходована «на дыхание»; это и есть величина прироста растений. Известно, что биопродукционные характеристики определяют средозащитный потенциал мерзлотно-таежных ландшафтов и скорость их восстановления после антропогенной трансформации; в этом же качестве выступает рассматриваемый показатель, являясь ключевым в данной категории.

Для расчета годовых значений чистой первичной продукции в NASA используются компоненты продукта MOD15A2H — индекс площади листьев (LAI) и доля фотосинтетически активной радиации (FPAR). Полученные значения представляют собой улучшенную версию данных продукта MOD17A2H, они генерируются в конце каждого года. Отметим, что в режиме реального времени улучшенные данные недоступны, поскольку сам продукт MOD15A2H рассчитывается только в конце календарного года.

В ходе работы исходные растры были усреднены за 5-летний период (2016–2020 гг.) и пересчитаны в растры с разрешением 10 км, что является оптимальным для регионального уровня исследования. Затем проведена процедура маскирования, создана маска водных объектов. Полученные маскированные слои были обработаны сначала низкочастотным фильтром сглаживания (Spatial Analyst/Neighborhood/Filter), затем — с использованием инструмента фокальной статистики. Эти инструменты в паре позволяют усреднить полученные показатели, сгладить шум, уменьшить экстремальные значения и выявить области относительно пониженных и повышенных величин (рис. 3). Низкочастотный фильтр сглаживания «размывает» границы между областями значений растра, присваивая каждому пикселю среднее значение из всех соседних пикселей (окно 3x3). Фокальная статистика также меняет значения в каждом пикселе на основе статистики значений соседних пикселей, причем область такого соседства может иметь

различную форму. В данном случае использовалась стандартное окно 3x3 (8 соседних пикселей).

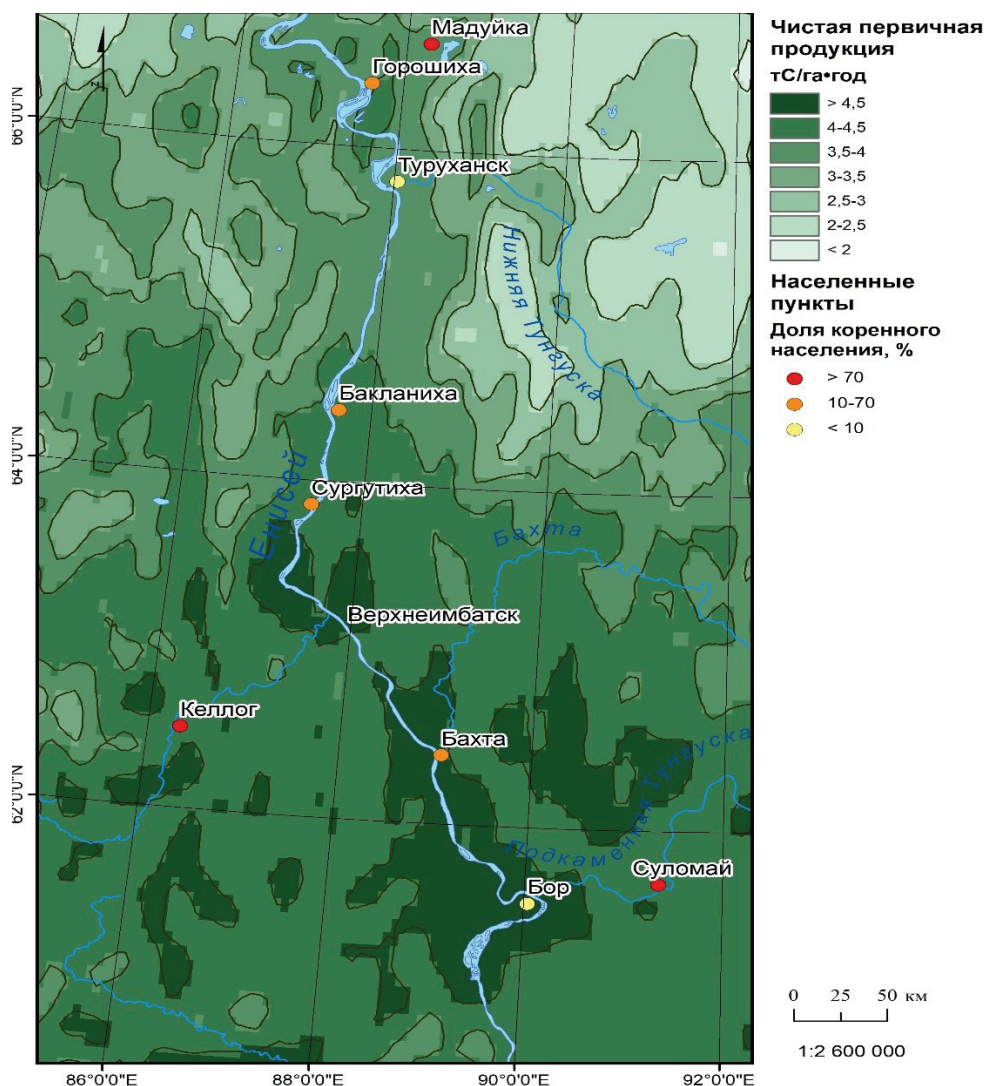


Рис. 2. Пространственное распределение значений чистой первичной продукции в пределах Енисейского Севера

Fig. 2. Spatial distribution of the values of net primary production within the Yenisei North

Чистая первичная продукция изначально оценивается в $\text{кгС}/\text{м}^2 \cdot \text{год}$, но для удобства в использовании полученные значения пересчитаны в $\text{ц}/\text{га} \cdot \text{год}$. По результатам проведенной работы были выявлены основные тенденции в пространственном распределении первичной продукции (рис. 2 и 3). Отчетливо заметно, что распределение данного показателя в основном соответствует зонально-ландшафтным различиям. На юге Енисейского Севера в качестве заметного фактора дифференциации значений чистой первичной продукции выступает также и рельеф. Так, максимальные значения чистой первичной продукции соответствуют разным типам ледниковых равнин [Медведков, 2016b], что является темой для отдельного анализа, но в рамках данной статьи мы остановимся только на выявленных соответствиях. На левобережье — это низкая ледниковая равнина с широким развитием аквальной морены, а на правобережье — ступенчато-холмистая и холмисто-грядовая ледниковая равнина.

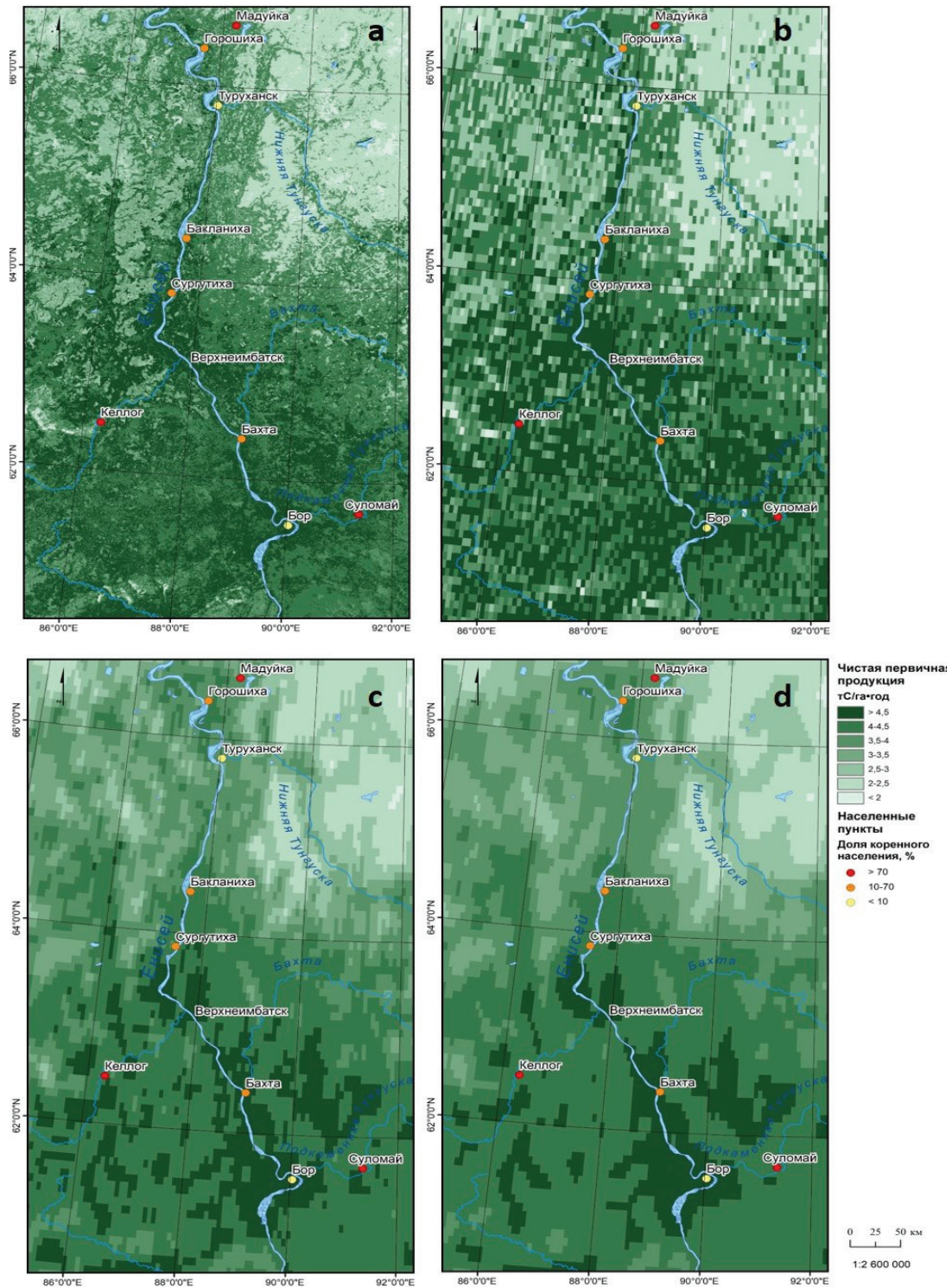


Рис. 3. Этапы обработки данных MODIS: **a** — исходные данные с разрешением 500 м, усредненные за 5 лет; **b** — исходные данные с разрешением 10 км; **c** — результат обработки данных фильтром сглаживания (низкочастотный); **d** — результат обработки данных фокальной статистикой (окно 3x3, среднее)

Fig. 3. Stages of MODIS data processing: **a** — initial data with a resolution of 500 m, averaged over 5 years; **b** — initial data with a resolution of 10 km; **c** — the result of data processing by a smoothing filter (low-frequency); **d** — the result of data processing by focal statistics (window 3x3, average)

Карта потока скрытого тепла (рис. 4). Для ее создания использовались исходные данные, представляющие собой растры 500-метрового разрешения со среднегодовыми значениями потока скрытого тепла. Поток скрытого тепла измеряется в Мдж/м²•день (2,3 Мдж необходимо в среднем для испарения 1 л воды, а в регионе Енисейского Севера значения колеблются от менее л/м²•день до 1,5 л/м²•день и немногим более). Также, как и полученные показатели чистой первичной продукции, среднегодовые значения потоков скрытого тепла представляют собой улучшенную форму данных на основе использования продукта MOD15A2H в сравнении со значениями, получаемыми в режиме реального времени. Для расчета потоков скрытого тепла обработка исходных данных производилась по аналогичной схеме, как и в случае получения значений чистой первичной продукции. Так, было проведено усреднение данных за 2016–2020 гг., произведено огрубление пространственного разрешения до 10 км и реализовано маскирование водных объектов, что позволило сгладить полученные значения.

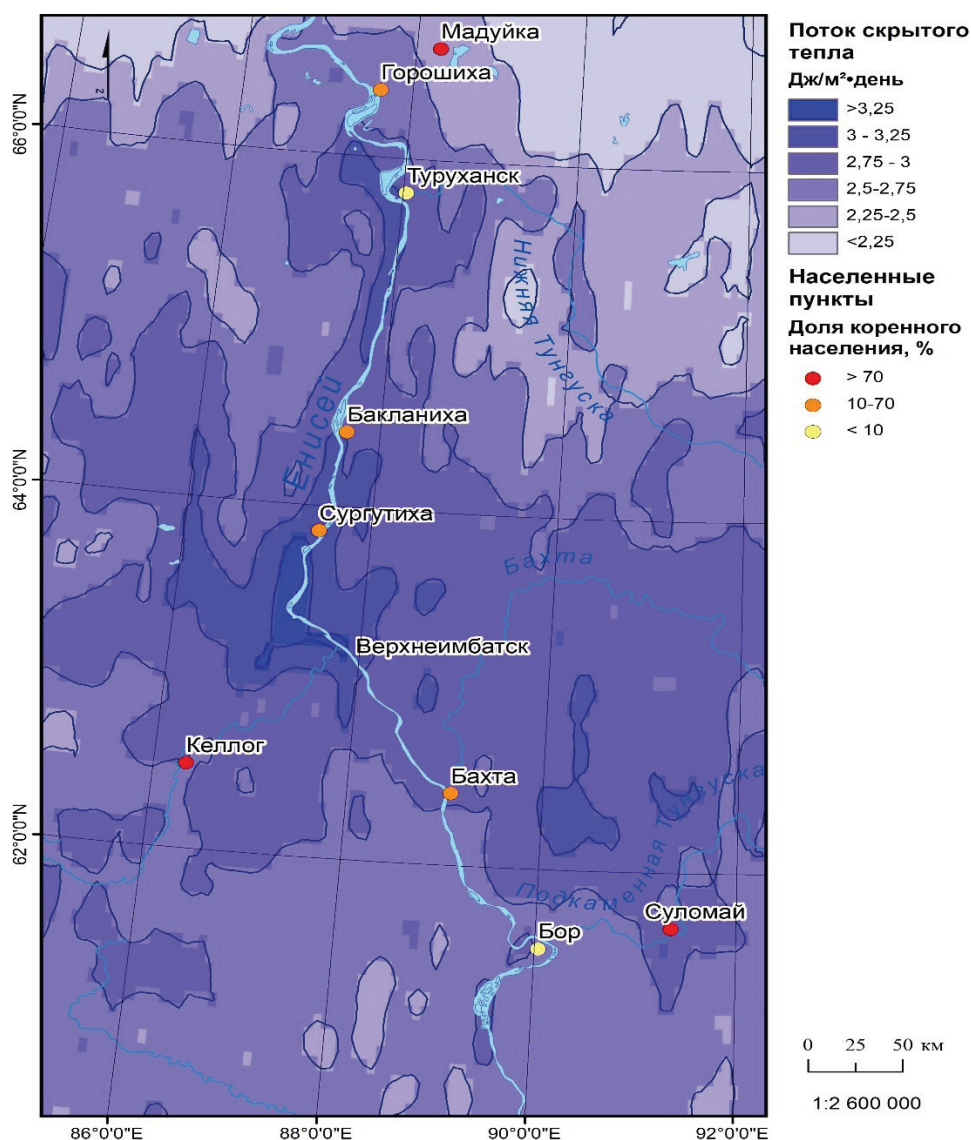


Рис. 4. Среднегодовые значения потоков скрытого тепла на территорию Енисейского Севера

Fig. 4. Average annual values of latent heat flows to the territory of the Yenisei North

Среднегодовые значения потока скрытого тепла в значительной степени индицируют гомеостатическую функцию лесов. Экологическое значение данного показателя заключается в том, что ландшафты с максимальным выбросом скрытого тепла имеют самый высокий потенциал влагообмена. В летнее время это выражается в форме появления «островов холода» на картах приповерхностных температур. Такие ландшафты не только с максимальной интенсивностью участвуют в водно-энергетическом обмене и лидируют по воспроизводству фитомассы, но также отличаются наибольшим противопожарным потенциалом в периоды с устойчивой сухой и солнечной погодой. В сибирской тайге данную роль выполняют немерзлотные ландшафты и природные комплексы с наименьшей степенью влияния процессов криогенеза на их структуру и функционирование [Медведков, 2016 (а); Medvedkov et al., 2023]. Представляется, что проявление гомеостатической функции лесов было бы более заметно по данным анализа летних значений (т. е. периода активной вегетации растений), но для этого потребовалось бы использование другого продукта с получаемыми значениями в режиме реального времени, что, по-видимому, снижало бы качество обрабатываемых данных.

Согласно рис. 5, наиболее заметно проявление экологической роли леса отмечается в той части Енисейской Сибири, где возрастают характеристики сплошности многолетней мерзлоты (т. е. там, где ее значения превышают 50 %). В этой области особенно заметно себя проявляют леса в долине р. Енисей, приуроченные к тальм породам. По-видимому, болотные комплексы несколько искажают пространственную картину потоков скрытого тепла, увеличивая его значения на отдельных участках, но данный вопрос требует отдельного изучения и последующего рассмотрения.

Карта разнообразия среды обитания растительного и животного мира (рис. 5). Оценка разнородности биогеоценотических условий [Tuanmu, Walter, 2015] основана на расчете статистических закономерностей (выражаемых статистическими показателями или метриками) в распределении улучшенного вегетационного индекса EVI (Enhanced Vegetation Index). Этот индекс представляет собой улучшенную версию индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), поэтому он применяется в многолесных районах, где способен показать больше градаций, чем NDVI, а также менее чувствителен к фоновому и атмосферному шуму.

Исследователями [Tuanmu, Walter, 2015] из базы данных «Global Habitat Heterogeneity» рассмотрены 14 метрик EVI с разрешением 1 км, 5 км и 25 км. Данные метрики по своему качеству превосходят обычные, которые рассчитываются по категориальным данным, таким как landcover. Одна из наиболее универсальных метрик, по мнению [Tuanmu, Walter, 2015] — это однородность (Homogeneity), отражающая как высокие, так и низкие значения и отрицательно связана с разнообразием. Поэтому мы используем именно ее для оценки разнородности биогеоценотических условий.

Коллегами [Tuanmu, Walter, 2015] проведено сравнение вклада различных показателей неоднородности в анализ видового разнообразия птиц. На стадии формулировки гипотезы данная идея нам представлялась логичной, учитывая, что природоведам хорошо известно об установленных территориальных трендах в сообществах птиц и коррелирующих с ними факторах среды, а также о выявленной связи между изменчивостью орнитокомплексов и неоднородностью местообитаний растений [Равкин и др., 2022].

В дальнейшем, при сопоставлении карты однородности местообитаний (рис. 5) с геоморфологическими особенностями территории Енисейского Севера, у нас возникли серьезные вопросы. Так, было выявлено, что участки с выровненным денудационным рельефом (Среднесибирского плоскогорья и Енисейский кряж) имеют в среднем более высокие показатели однородности, а речные долины и низменности — более низкие.

Согласно представленной карте (рис. 5), особенно высоким разнообразием отличается долина Енисея. Полученные результаты несколько смущают, учитывая, что для территорий (т. е. в пределах денудационных поверхностей) с высокими показателями однородности типичен ярусный характер строения рельефа. Ярусность рельефа, собственно, и влияет на изменчивость биогеоценотических условий [Медведков, 2022], что также отражается и на разнообразии охотничье-промысловых ресурсов для традиционного природопользования.

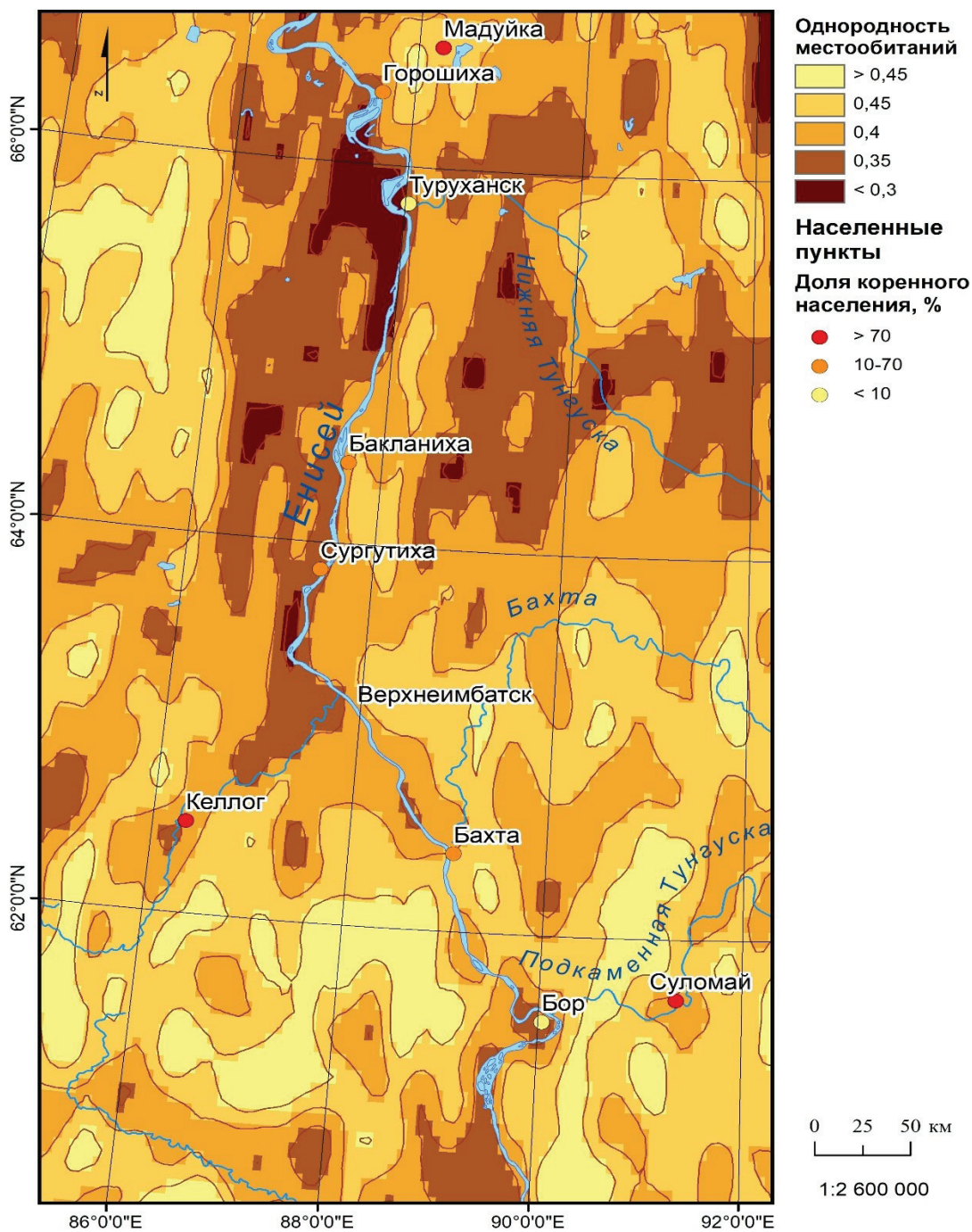


Рис. 5. Однородность местообитаний растений и животных
Fig. 5. Heterogeneity of plant and animal habitats

Авторы упомянутой методики и сами говорят о сложности сопоставления формальных показателей с реальными биогеофизическими процессами [Tuanmu, Walter, 2015]. Перспективы улучшения рассматриваемого подхода видятся им в возможности дополнения полученных метрик другими данными, например, значениями приповерхностной температуры и эвапотранспирации, которые будут отражать иные аспекты неоднородности среды обитания. Таким образом, полученные выводы предполагают необходимость проведения дальнейших исследований по выявлению связей между показателями однородности местообитаний и ландшафтной структурой территории.

ВЫВОДЫ

Выбранные показатели отражают разную степень соответствия полученных значений влиянию важнейших факторов физико-географической дифференциации (геолого-геоморфологическое строение и климатические условия). В целом это соответствие выявлено, но нуждается в более внимательном изучении, в т. ч. с привлечением результатов полевых исследований и архивных материалов геологических экспедиций. Наиболее проблемным из числа анализируемых оказался показатель однородности местообитаний растений и животных. Так, выявлено, что территории на западе Среднесибирского плоскогорья и севере Енисейского кряжа имеют в среднем более высокие показатели однородности в сравнении с долинами рек и низинами. Следует отметить, что Енисейский кряж и Среднесибирское плоскогорье — это территории со сложным строением рельефа, они представлены в виде денудационных поверхностей с присущим им ярусным строением рельефа.

Представляется, что значительная часть выбранных показателей (сплошность и температура многолетней мерзлоты, чистая первичная продукция и поток скрытого тепла) отражают экологические свойства ландшафтов на региональном уровне, но для перехода на более крупномасштабный уровень потребуются привлечение дополнительных данных, которые позволят детализировать имеющуюся картину в части лучшего понимания природно-ландшафтной структуры территории и средозащитной роли ее геосистем.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 21-77-00048, <https://rscf.ru/project/21-77-00048/>.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Science Foundation, grant No. 21-77-00048, <https://rscf.ru/project/21-77-00048/>.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Астахов В.И. Четвертичная гляциотектоника Урало-Сибирского Севера. Геология и геофизика, 2019. Т. 60. № 12. С. 1692–1708. DOI: 10.15372/GiG2019136.

Атлас снежно-ледовых ресурсов мира: в 2 т. Т. 1. М.: Институт географии РАН, 1997. 392 с.

Владимиров И.Н. Природная сущность и социальная значимость экологического потенциала геосистем. География и природные ресурсы, 2019. № 5. С. 12–18. DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-5(12-18).

Втюрин Б.И. Подземные льды СССР. М.: Наука, 1975. 214 с.

Горшков С.П., Карраш Х., Парамонов А.В. Геоморфологическая индикация мерзлотных и немерзлотных ландшафтов средней тайги Центральной Сибири. Геоморфология, 1998. № 4. С. 55–61.

Исаченко А.Г. Экологическая география России. СПб: СПбГУ, 2001. 327 с.

Корейша М.М., Соколов Б.Л. Подземные льды и наледи. Материалы гляциологических исследований. Программа и методические основы составления атласа снежно-ледовых ресурсов мира, 1992. Вып. 74. С. 158–163.

Медведков А.А. Картографирование криогенных ландшафтов на основе анализа тепловых снимков. ИнтерКарто. ИнтерГИС, 2016 (а). Т. 22. Ч. 1. С. 380–384. DOI: 10.24057/2414-9179-2016-1-22-380-384.

Медведков А.А. Среднетаежные геосистемы Приенисейской Сибири в условиях меняющегося климата. М.: МАКС Пресс, 2016 (б). 144 с.

Медведков А.А. Картографирование геолого-геоморфологической основы ландшафтов для управления экологическими рисками в условиях ярусного строения рельефа южной криолитозоны. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Междунар. конф. М.: Географический факультет МГУ, 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 78–90. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-78-90.

Равкин Ю.С., Цыбулин С.М., Ананин А.А., Железнова Т.К., Вартапетов Л.Г., Юдкин В.А., Жуков В.С., Преображенская Е.С., Стишов М.С., Торопов К.В., Равкин Е.С., Богомолова И.Н., Чеснокова С.В., Лялина М.И. Эколого-географическая организация и структура летнего населения птиц Северной Евразии. Общая биология, 2022. Т. 83. № 4. С. 302–320. DOI: 10.31857/S0044459622040066.

Haralick R.M., Shanmugam K., Dinstein I.H. Textural features for image classification. IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, 1973. V. 3. P. 610–621.

Medvedkov A.A., Vysotskaya A.A., Olchev A.A. Detection of geocryological conditions in boreal landscapes of the southern cryolithozone using thermal infrared remote sensing data: A case study of the northern part of the Yenisei Ridge. Remote Sensing, 2023. V. 15. No. 2. Art. 291. DOI: 10.3390/rs15020291.

Running S., Mu Q., Zhao M., Moreno A. MODIS/Terra net evapotranspiration gap-filled yearly L4 global 500m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2021. DOI: 10.5067/MODIS/MOD16A3GF.061.

Running S., Zhao M. MODIS/Terra net primary production gap-filled yearly L4 Global 500m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2021. DOI: 10.5067/MODIS/MOD17A3HGF.061.

Strien van M.J., Grêt-Regamey A. Unsupervised deep learning of landscape typologies from remote sensing images and other continuous spatial data. Environmental Modelling & Software, 2022. V. 155. Art. 105462. DOI: 10.1016/j.envsoft.2022.105462.

Tuanmu M.-N., Jetz W. A global, remote sensing-based characterization of terrestrial habitat heterogeneity for biodiversity and ecosystem modeling. Global Ecology and Biogeography, 2015. V. 24. P. 1329–1339. DOI: 10.1111/geb.12365.

REFERENCES

Astakhov V.I. Quaternary glaciotectonics of the Ural-Siberian north. Russian Geology and Geophysics, 2019. V. 60. No. 12. P. 1692–1708 (in Russian). DOI: 10.15372/GiG2019136.

Gorshkov S.P., Karrash H., Paramonov A.V. Geomorphological indication of permafrost and non-permafrost landscapes of the middle taiga of Central Siberia. Geomorfologiya, 1998. No. 4. P. 55–61 (in Russian).

- Haralick R.M., Shanmugam K., Dinstein I.H.* Textural features for image classification. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 1973. V. 3. P. 610–621.
- Isachenko A.G.* Ecological geography of Russia. St. Petersburg: St. Petersburg State University, 2001. 327 p. (in Russian).
- Koreisha M.M., Sokolov B.L.* Underground ice and icefield. Materials of glaciological research. The program and methodological foundations of compiling a world atlas of snow and ice resources, 1992. Iss. 74. P. 158–163 (in Russian).
- Medvedkov A.A.* Mapping of permafrost landscapes based on the analysis of thermal images. *InterCarto. InterGIS*, 2016 (a). V. 22. Part 1. P. 380–384 (in Russian). DOI: 10.24057/2414-9179-2016-1-22-380-384.
- Medvedkov A.A.* Mid-taiga geosystems of the Yenisei Siberia under climate change. Moscow: MAKS Press, 2016 (b). 144 p. (in Russian).
- Medvedkov A.A.* Mapping of the geological and geomorphologic basement of landscapes under the level structure of relief for managing environmental risks within the southern cryolithozone. *InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference*. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2022. V. 28. No. 1. P. 78–90 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-78-90.
- Medvedkov A.A., Vysotskaya A.A., Olchev A.A.* Detection of geocryological conditions in boreal landscapes of the southern cryolithozone using thermal infrared remote sensing data: A case study of the northern part of the Yenisei Ridge. *Remote Sensing*, 2023. V. 15. No. 2. Art. 291. DOI: 10.3390/rs15020291.
- Ravkin Y.S., Tsybulin S.M., Ananin A.A., Zheleznova T.K., Vartapetov L.G., Yudkin V.A., Zhukov V.S., Preobrazhenskaya E.S., Stishov M.S., Toropov K.V., Ravkin E.S., Bogomolova I.N., Chesnokova S.V., Lyalina M.I.* Ecological and geographical organization and structure of the summer bird assemblages of Northern Eurasia. *Biology Bulletin Reviews*, 2022. V. 83. No. 4. P. 302–320 (in Russian). DOI: 10.31857/S0044459622040066.
- Running S., Mu Q., Zhao M., Moreno A.* MODIS/Terra Net Evapotranspiration Gap-Filled Yearly L4 Global 500m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2021. DOI: 10.5067/MODIS/MOD16A3GF.061.
- Running S., Zhao M.* MODIS/Terra Net Primary Production Gap-Filled Yearly L4 Global 500m SIN Grid V061. NASA EOSDIS Land Processes DAAC, 2021. DOI: 10.5067/MODIS/MOD17A3HGF.061.
- Strien van M.J., Grêt-Regamey A.* Unsupervised deep learning of landscape typologies from remote sensing images and other continuous spatial data. *Environmental Modelling & Software*, 2022. V. 155. Art. 105462. DOI: 10.1016/j.envsoft.2022.105462.
- Tuanmu M.-N., Jetz W.* A global, remote sensing-based characterization of terrestrial habitat heterogeneity for biodiversity and ecosystem modeling. *Global Ecology and Biogeography*, 2015. V. 24. P. 1329–1339. DOI: 10.1111/geb.12365.
- Vladimirov I.N.* Natural essence and social significance of the ecological potential of geosystems. *Geography and Natural Resources*, 2019. No. 5. P. 12–18 (in Russian). DOI: 10.21782/GIPR0206-1619-2019-5(12-18).
- Vtyurin B.I.* Underground ice of the USSR. Moscow: Nauka, 1975. 214 p. (in Russian).
- World atlas of snow and ice resources: in 2 v. V. 1. Moscow: Institute of Geography of Russian Academy of Sciences, 1997. 392 p.