

УДК: 528.9+911.2:551.34+630*232

DOI: 10.35595/2414-9179-2025-1-31-341-354

Б. В. Содномов¹, А. А. Аюржанаев², В. Н. Черных³, С. Г. Андреев⁴, С. А. Сат⁵,
Е. Ж. Гармаев⁶

КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ЛЕСНЫХ МАССИВОВ В ЗОНАХ НАЛЕДЕОБРАЗОВАНИЯ БАССЕЙНА Р. СЕЛЕНГИ

АННОТАЦИЯ

Наледи являются объектами криосферы, оказывающими значительное влияние на природные экосистемы и инженерную инфраструктуру. Интерес представляют наледи, расположенные в лесных массивах, поскольку в древесных кольцах может содержаться информация о динамике наледных процессов. Настоящая работа посвящена картографированию лесных массивов в зоне влияния наледей с целью определения перспективных участков для дендрохронологических исследований наледных процессов в бассейне трансграничной р. Селенги. Для картографирования наледей в работе использованы данные дистанционного зондирования Земли среднего пространственного разрешения (Landsat-8, Sentinel-2, Канопус-В). Для оценки наличия лесной растительности в пределах наледей использовались три глобальных продукта высоты древесного покрова: ETH (на основе Sentinel-2 и GEDI), GFCH (на основе Landsat и GEDI) и GCHM (созданная на моделях искусственного интеллекта по спутниковым снимкам). Результаты анализа показали, что в пределах 65 % наледей присутствует древесная растительность. Такие объекты преимущественно расположены в российской части бассейна на склонах хребтов, где преобладают лиственничники и кедрово-пихтовые леса. В монгольской части леса встречаются значительно реже и в основном представлены разреженными лиственничниками. На основе аэрофотосъемки ключевого полигона создана цифровая модель местности с точностью 0,1 м и выполнена верификация глобальных моделей высоты. Сравнительный анализ глобальных моделей высот на ключевом участке выявил завышение оценок по сравнению с моделью высот деревьев, полученной по данным аэрофотосъемки. Ожидается, модель с более высоким пространственным разрешением лучше соответствует реальной картине горизонтальной структуры древостоя, но отмечается наличие значительной погрешности по высоте. Тем не менее, они позволяют выделить участки с потенциально пригодными для дендрохронологического анализа деревьями. Таким образом, сформированная в рамках исследования база пространственных данных о лесах в зонах наледей может быть использована для планирования отбора древесных проб и дальнейших дендрохронологических исследований наледных процессов на территории бассейна р. Селенги.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: наледи, дендрохронология, бассейн Селенги, картографирование, высота леса

¹ Байкальский институт природопользования СО РАН, ул. Сахьяновой, д. 6, Улан-Удэ, Россия, 670047, *e-mail*: sodnomov@binm.ru

² Байкальский институт природопользования СО РАН, ул. Сахьяновой, д. 6, Улан-Удэ, Россия, 670047, *e-mail*: aaayurzhanaev@yandex.ru

³ Байкальский институт природопользования СО РАН, ул. Сахьяновой, д. 6, Улан-Удэ, Россия, 670047, *e-mail*: geosibir@yandex.ru

⁴ Байкальский институт природопользования СО РАН, ул. Сахьяновой, д. 6, Улан-Удэ, Россия, 670047, *e-mail*: baikal.andreev@gmail.com

⁵ Байкальский институт природопользования СО РАН, ул. Сахьяновой, д. 6, Улан-Удэ, Россия, 670047, *e-mail*: saygaa@mail.ru

⁶ Байкальский институт природопользования СО РАН, ул. Сахьяновой, д. 6, Улан-Удэ, Россия, 670047, *e-mail*: info@binm.ru

Bator V. Sodnomov¹, Alexander A. Ayurzhanayev², Vladimir N. Chernykh³, Sergey G. Andreev⁴, Saygaa A. Sat⁵, Endon Zh. Garmaev⁶

MAPPING OF FORESTS IN ICINGS ZONES OF THE SELENGA RIVER BASIN

ABSTRACT

Icings are cryospheric features that exert a significant influence on natural ecosystems and engineering infrastructure. Particular interest is drawn to icings located within forested areas, as trees can respond to their impacts, recording information about the dynamics of icing processes in their growth rings. This study focuses on mapping forest stands within icing-affected zones to identify promising areas for future dendrochronological investigations of icing processes in the transboundary Selenga River Basin. For the purpose of icing mapping, the study employed medium-resolution satellite remote sensing data (Landsat-8, Sentinel-2, Kanopus-V). To assess the presence of forest vegetation within icing zones, three global canopy height products were utilized: ETH (based on Sentinel-2 and GEDI), GFCH (based on Landsat and GEDI), and GCHM (an AI-based model derived from satellite imagery). The analysis revealed that approximately 65 % of the mapped icings are covered by forest vegetation. These forested icings are predominantly located in the Russian part of the basin, particularly on mountain slopes, where larch and cedar-fir forests are dominant. In contrast, forested icings are significantly less common in the Mongolian part of the basin and are mainly represented by sparse larch stands. At a key site a high-resolution digital elevation model with 0.1 m accuracy was created based on UAV-based aerial photography. This dataset was used to validate the global canopy height models. Comparative analysis at the test site demonstrated that global models tend to overestimate tree heights when compared to values derived from UAV. As expected, the model with the higher spatial resolution more accurately represented the horizontal structure of the forest canopy, though it still exhibited substantial height inaccuracies. Nevertheless, these global models proved useful for identifying areas containing trees that are potentially suitable for dendrochronological analysis. Thus, the spatial database of forested icing zones developed in this study can serve as a foundation for planning the collection of tree-ring samples and conducting further dendrochronological research on icing processes throughout the Selenga River Basin.

KEYWORDS: icings, dendrochronology, Selenga River basin, mapping, forest height

ВВЕДЕНИЕ

Наледи представляют собой слоистые ледяные массивы или корку льда на поверхности земли, льда или инженерных сооружений, образовавшиеся при замерзании периодически изливающихся природных или техногенных вод [Алексеев, 2007]. Многолетняя динамика наледеобразования тесно связана с гидрогеологическими процессами, которые, в

¹ Baikal Institute of Nature Management of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 6, Sakhyanovoy str., Ulan-Ude, 670047, Russia, *e-mail*: sodnomov@binm.ru

² Baikal Institute of Nature Management of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 6, Sakhyanovoy str., Ulan-Ude, 670047, Russia, *e-mail*: aaayurzhanayev@yandex.ru

³ Baikal Institute of Nature Management of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 6, Sakhyanovoy str., Ulan-Ude, 670047, Russia, *e-mail*: geosibir@yandex.ru

⁴ Baikal Institute of Nature Management of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 6, Sakhyanovoy str., Ulan-Ude, 670047, Russia, *e-mail*: baikal.andreev@gmail.com

⁵ Baikal Institute of Nature Management of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 6, Sakhyanovoy str., Ulan-Ude, 670047, Russia, *e-mail*: saygaa@mail.ru

⁶ Baikal Institute of Nature Management of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, 6, Sakhyanovoy str., Ulan-Ude, 670047, Russia *e-mail*: info@binm.ru

свою очередь, зависят от геологических условий местности, климатических флуктуаций и антропогенных факторов. В условиях глобального потепления, вызывающего деградацию многолетнемерзлых пород, происходит сокращение размеров наледей северо-востока России [Гаврилова, 2003; Алексеев, 2016; Землянскова и др., 2025], рассредоточение крупных и формирование новых небольших наледей [Поморцев и др., 2010]. В последние годы в бассейне трансграничной р. Селенги активизировались исследования наледей [Walther et al., 2021; Chernykh et al., 2024]. Актуальность работ обусловлена сравнительно слабой изученностью региона, негативным влиянием наледей на инфраструктуру [Марков и др., 2016; Черных, 2024], их ролью в поддержании весеннего стока малых водотоков [Черных, Гармаев, 2023], а также практической ценностью для сельского хозяйства [Черных и др., 2024].

Метод дендрохронологического анализа используют для реконструкции климатических параметров, индикации опасных природных явлений, датировки исторических сооружений и др. [Андреев и др., 2022; Жарников и др., 2022; Быков и др., 2024; Davi et al., 2010; Pederson et al., 2014; Belokopytova et al., 2018; Bigio et al., 2022]. Одним из направлений в рамках дендрогляциологии можно выделить исследование влияния наледей на радиальный прирост деревьев. Наледные процессы оказывают влияние на гидротермические характеристики местности, а также могут вызывать механические повреждения ствола, что в конечном итоге отражается в структуре годовичных колец. Анализ дендрохронологических данных позволяет установить связи с наледными процессами и реконструировать динамику наледообразования в периоды, не охваченные инструментальными наблюдениями. Подобные исследования осуществлялись и продолжаются в ряде регионов с активным наледообразованием, таких как горные системы Алтая, Западного Саяна, а также в криолитозоне Якутии [Николаев, 2010; Поморцев и др., 2017; Вуков et al., 2023]. Однако комплексные исследования наледных процессов с применением методов древесно-кольцевой индикации в пределах бассейна р. Селенги до настоящего времени не проводились. Важный этап для их развития — картографирование лесных массивов в зонах влияния наледей с целью определения потенциальных участков отбора древесных образцов, что и явилось целью настоящей работы.

Для длительных реконструкций предпочтительны хвойные породы деревьев лиственницы сибирской (*Larix sibirica*) и кедра сибирского (*Pinus sibirica*). Эти типы древесных сообществ формируют основной запас потенциальных дендрохронологических индикаторов, поскольку они дают длинные и хорошо датируемые хронологии.

Территория исследования

Бассейн р. Селенги — крупнейшего притока оз. Байкал — охватывает территории Монголии и России, занимая около 447 000 км². Несмотря на то, что 67 % территории бассейна расположено в Монголии, свыше половины его годового стока (15,4 км³ из 30 км³) формируется в российской части [Ульзетуева, Гомбоев, 2016]. Территория бассейна отличается выраженным горно-долинным рельефом. Основные орографические структуры включают Восточный Саян, Хэнтэй, Хангай, Селенгинский хребет и Забайкальское нагорье. На территории Монголии горные массивы отличаются сглаженными очертаниями рельефа, напоминающими почти равнины, которые расчленены речными долинами. Для российской части бассейна характерно чередование хребтов с высотами 1 300–1 800 м и межгорных впадин, расположенных на отметках 550–1 000 м. Понижения между хребтами, протягивающиеся преимущественно в северо-восточном направлении, образуют долины крупнейших притоков Селенги — рр. Джиды, Хилок и Уда, которые протекают по днищам этих межгорных котловин [Гармаев и др., 2022].

В бассейне р. Селенги наиболее полные сведения о наледных процессах получены во второй половине XX в. в ходе комплексных гидрогеологических и геокриологических исследований, основные результаты которых отражены в [Гидрогеология..., 1970; Геокриология..., 1989]. Наледные образования в исследуемом регионе имеют относительно малые размеры (площадь менее 1 км²) и формируются по южному типу [Алексеев и др., 2022]. Для них характерны выраженная пространственная динамика и значительные межгодовые колебания как площадей, так и объемов [Алексеев, 2016]. В отдельные годы многие наледные отложения демонстрируют резкое увеличение своей площади, распространяются в прилегающих лесах за пределами устоявшейся наледной поляны [Alekseyev, 2015].

Лесной покров бассейна р. Селенги занимает около 37 % его площади, или ≈165 тыс. км², и образует мозаичную последовательность бореальных и лесостепных сообществ, варьирующихся по высотным и увлажнительным градиентам. В пределах бассейна эта мозаика выделяется в следующие формации: на более теплых южных экспозициях преобладают разреженные сосновые леса и степные луга, тогда как холодные и влажные северные склоны удерживают таежные лиственнично-березовые и кедрово-пихтовые леса [Экологический..., 2015].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Картографирование наледных полей выполнено с использованием данных ДЗЗ среднего пространственного разрешения Landsat-8 (разрешение 30 м), Sentinel-2 (10 м), Канопус-В (10 м). Определение полигонов наледных полей выполнено по методике, описанной в [Chernykh et al., 2024] на основе анализа нормализованного разностного индекса снега (NDSI) с применением автоматизированного выделения наледей и ледяных полей с последующей верификацией и ручной корректировкой полигонов. Таким образом, на территории бассейна р. Селенги выделено 29 054 наледей по состоянию на 2021 г.

Для определения массивов леса использована глобальная карта высоты древесного покрова ETH Global Sentinel-2 10m Canopy Height 2020 (ETH) с пространственным разрешением 0,3 угловой секунды (~9×6 м в районе исследования). Данные ETH основаны на спутниковых снимках Sentinel-2 и лидарных данных проекта NASA Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) [Lang et al., 2023]. Также в работе использованы данные глобальной карты Global Forest Canopy Height 2019 (GFCH) с пространственным разрешением 0,9 угловой секунды (~27×18 м в районе исследования), разработанной путем интеграции GEDI и снимков Landsat [Potapov et al., 2020].

Таким образом был определен ряд перспективных участков для отбора дендрохронологических проб. В ходе полевых исследований в 2024 г. на ключевом участке, расположенном в районе пос. Старая Брянь (Зайграевский район, Республика Бурятия) — одном из наиболее подверженных наледным угрозам населенном пункте в российской части бассейна — выполнены комплексные работы по изучению наледи. Проведена аэрофотосъемка с беспилотного летательного аппарата (БПЛА), на основе которой получены ортофотоплан и цифровая модель местности (ЦММ). Оценка высоты деревьев на полигоне выполнена с использованием полученной ЦММ, данных ETH, GFCH, а также Global Canopy Height Maps (GCHM). GCHM — это глобальный продукт, представляющий растр высот деревьев с пространственным разрешением 0,033 угловой секунды (~1×0,6 м в районе исследования), созданный на моделях искусственного интеллекта по спутниковым снимкам с 2009 по 2020 гг. с акцентом на период с 2018 по 2020 гг. [Tolan et al., 2024].

С использованием инструмента «Зональная статистика» выявлено максимальное значение высоты леса для каждой наледи и определено количество ячеек, в которых отмечено наличие леса, что позволило определить площадь лесопокрываемых территорий в пределах каждой наледи. Для исключения прибрежной и иной древесно-кустарниковой

растительности в анализе учитывались пиксели со значениями высот более 10 м. С целью визуализации на мелкомасштабных картах проведено усреднение площади леса внутри наледей в ячейках регулярной сетки с шагом 0,25°.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате работы получена карта распределения лесных массивов в пределах наледных полей в ячейках регулярной сетки (рис. 1). Анализ пересечений участков леса с векторным слоем наледей показал, что в пределах 18 764 наледей (65 % от их количества) произрастают деревья. Значительно больше ячеек с высокой лесистостью (средняя площадь лесных массивов в пределах наледей) в российской части бассейна р. Селенги, которые располагаются в привершинной части хребтов: Малый Хамар-Дабан на западе российской части бассейна, Курбинский, Цаган-Хуртей и другие в восточной части бассейна. В пределах Хэнтэй-Чикойского нагорья наблюдается высокая лесистость как в монгольской, так и в российской частях востока бассейна. На остальной территории монгольской части бассейна площадь лесов на наледных полях существенно ниже (на западе) или не наблюдается вовсе (в центральной и южной частях).

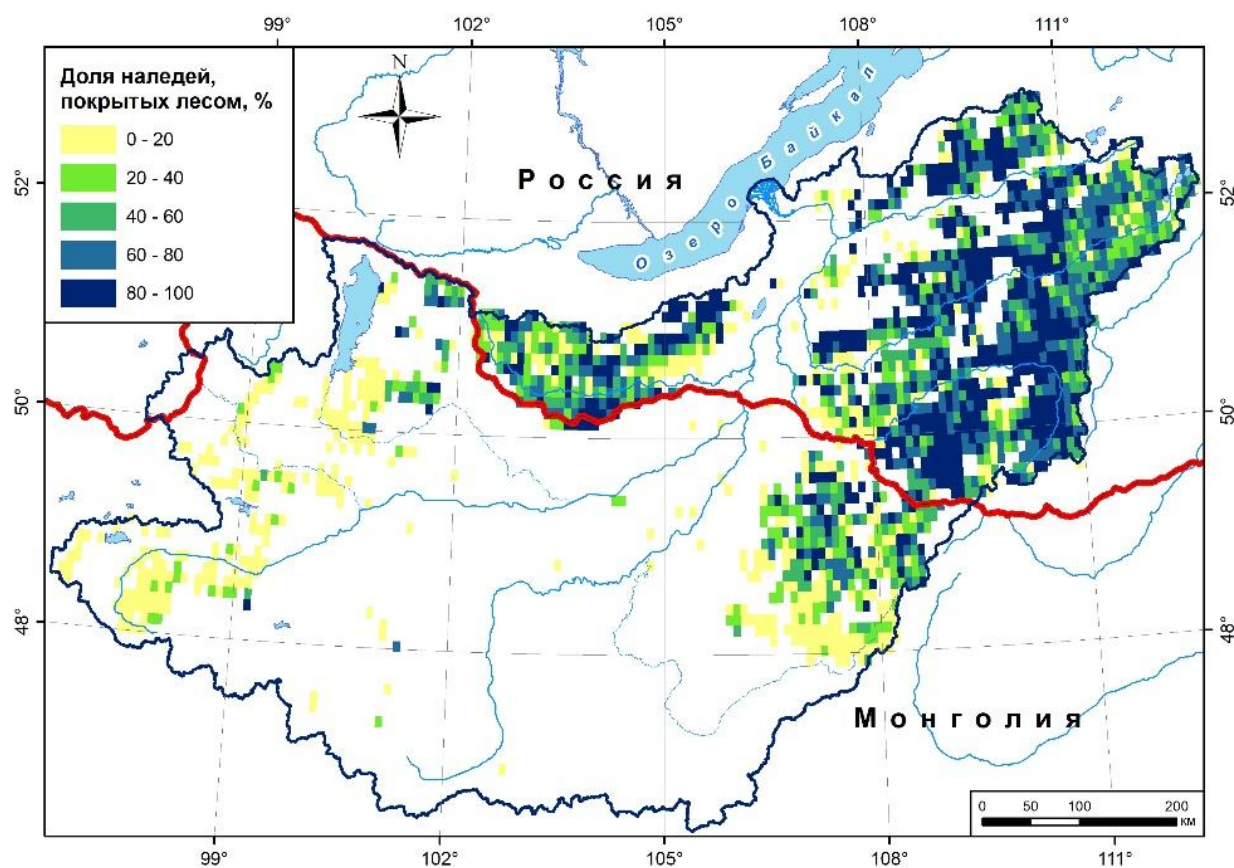


Рис. 1. Доля наледей, покрытых лесом, по данным ЕТН
Fig. 1. Proportion of icings covered by forest according to ETH data

В российской части бассейна наледи приурочены главным образом к узким долинам Малого Хамар-Дабана, Цаган-Хуртея и Курбинского хребта. Древостой здесь формируют светлохвойные лиственничники (*Larix sibirica*) с примесью кедра сибирского (*Pinus sibirica*) и темнохвойные пихтово-кедровые леса. По периферии наледных полей развиты кедрово-лиственничные редколесья. В днищах долин встречаются галерейные сообщества ели сибирской (*Picea obovata*), ивы (*Salix caprea s. l.*) и тополиных куртин (*Populus*

laurifolia). В монгольской части лесистые наледи сконцентрированы на северных склонах Хэнтэй-Чикойского нагорья в верховьях Орхона, в пределах Хангайского массива — в верховьях рр. Чулуут, Идэр и Тугруу-Туртуйн-Гол. Здесь доминируют лиственницы с участием березы (*Betula platyphylla*) и сосны (*Pinus sylvestris*). Структура древостоя характеризуется низкой сомкнутостью (20–40 %) и высотами полога до 17–18 м, что обусловлено аридными условиями лесостепи [Экологический..., 2015]. Отметим, что нередко вдоль берегов небольших водотоков в зону влияния наледей попадают ивы, которые, хотя и не обладают большим сроком жизни, тем не менее могут служить ценным индикатором наледообразования.

Для примера приведем крупномасштабную карту, на которой представлена характерная картина распределения участков леса в пределах наледных полей на южном склоне хр. Мал. Хамар-Дабан (рис. 2). Можно отметить, что наиболее высокие деревья на наледных полях располагаются на большей высоте. Это связано с общей структурой распределения лесной растительности: в нижней части склонов участки часто приурочены к лесостепному поясу, где естественная лесистость изначально снижена. В то же время нельзя исключать и антропогенное влияние, включая хозяйственную и нелегальную вырубку крупных деревьев, которое более выражено вблизи населенных пунктов и транспортной инфраструктуры. Таким образом, при выборе участков для дендрохронологического анализа с большим историческим охватом, предпочтение следует отдавать участкам, расположенным на более высоких, слабо нарушенных уровнях, однако такие участки являются труднодоступными.

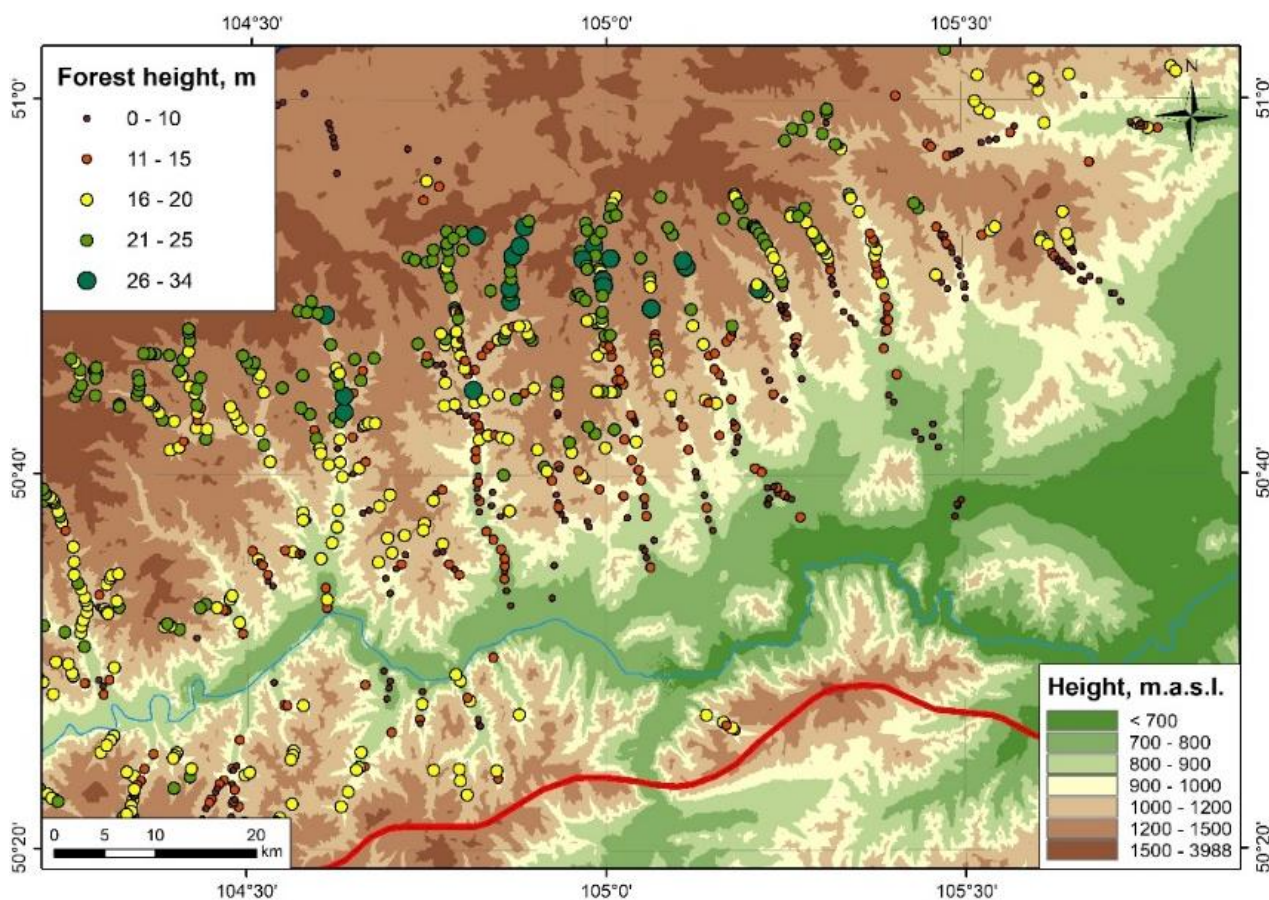
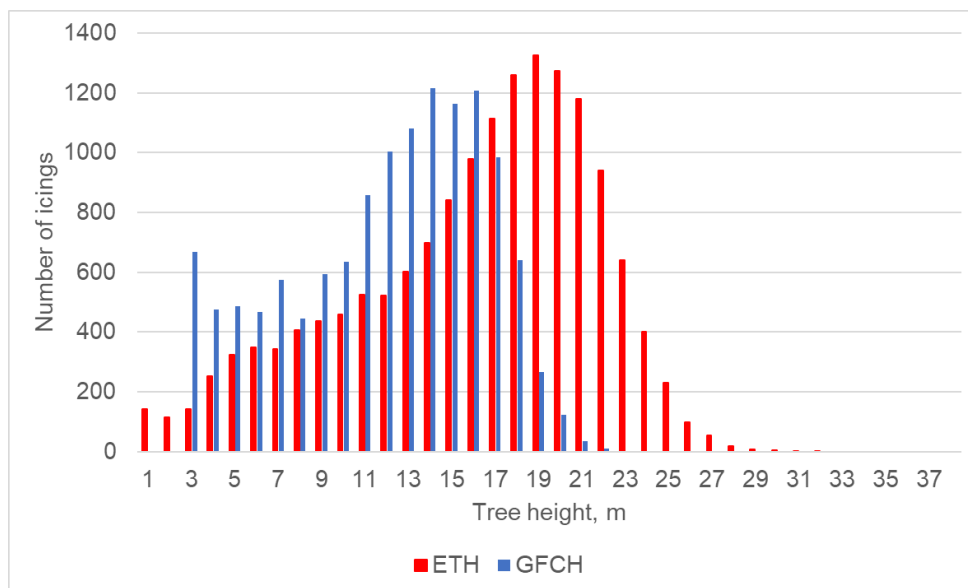
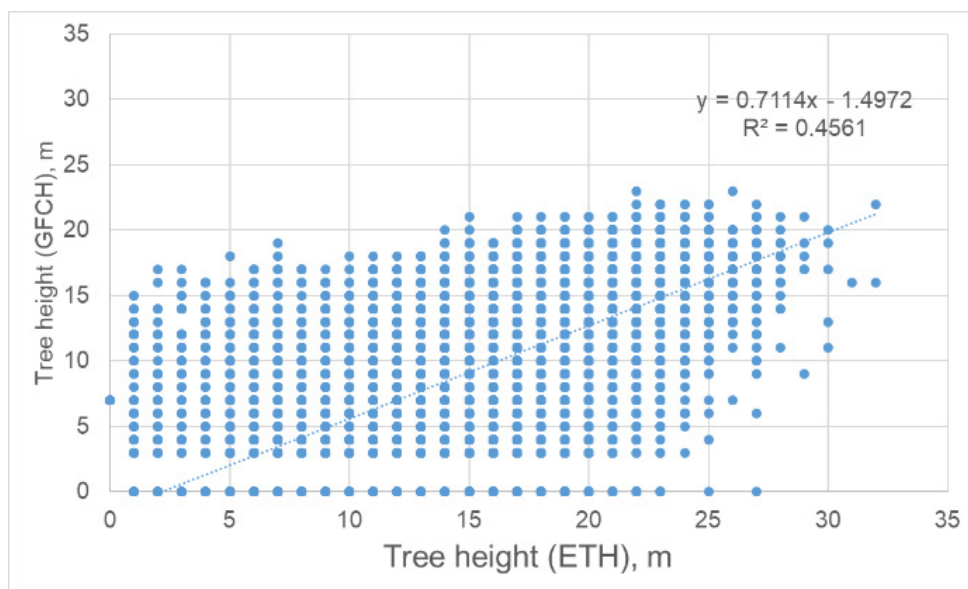


Рис. 2. Распределение высоты лесного полога на наледях (хр. Малый Хамар-Дабан)
Fig. 2. Distribution of forest canopy height on icings (Maliy Khamar-Daban Ridge)

Данные высот с пространственным разрешением 30 м (GFCH) систематически дают меньшие значения, чем с разрешением 10 м (ETH), особенно при больших высотах леса. Оба распределения имеют форму, близкую к нормальной, но пик по данным GFCH наблюдается в диапазоне 14–16 м, ETH — 17–19 м (рис. 3а). Высоты в ETH в среднем немного выше, чем в GFCH на основном интервале. ETH дает более высокие значения на «хвосте» (от 22 до 35 м), которые отсутствуют или сильно занижены у GFCH. Также ETH демонстрирует более широкий диапазон и плавное распределение, что объясняется более высоким разрешением. Несмотря на умеренную корреляцию (0,46), на уровне распределений видно, что эти модели не полностью взаимозаменяемы (рис. 3б).



а/а)



б/б)

Рис. 3. Сравнительные графики распределения высоты лесного покрова на наледях по данным GFCH и ETH: а) гистограмма распределения; б) корреляционное поле
Fig. 3. Comparative graphs of the distribution of forest cover height on icings according to GFCH and ETH data: а) distribution histogram; б) correlation field

По данным аэрофотосъемки с БПЛА на ключевом участке в районе пос. Старая Брянь в результате обработки в ПО Agisoft Metashape получены ортофотоплан (рис. 4а) и цифровая модель местности ключевой наледной поляны с разрешением 10 см/пикс. В ПО Agisoft Metashape проведена классификация облака точек на два класса: «растительность» и «земля». Далее по точкам класса «земля» построена цифровая модель рельефа, и путем вычитания моделей получен растровый слой высоты деревьев (рис. 4б).

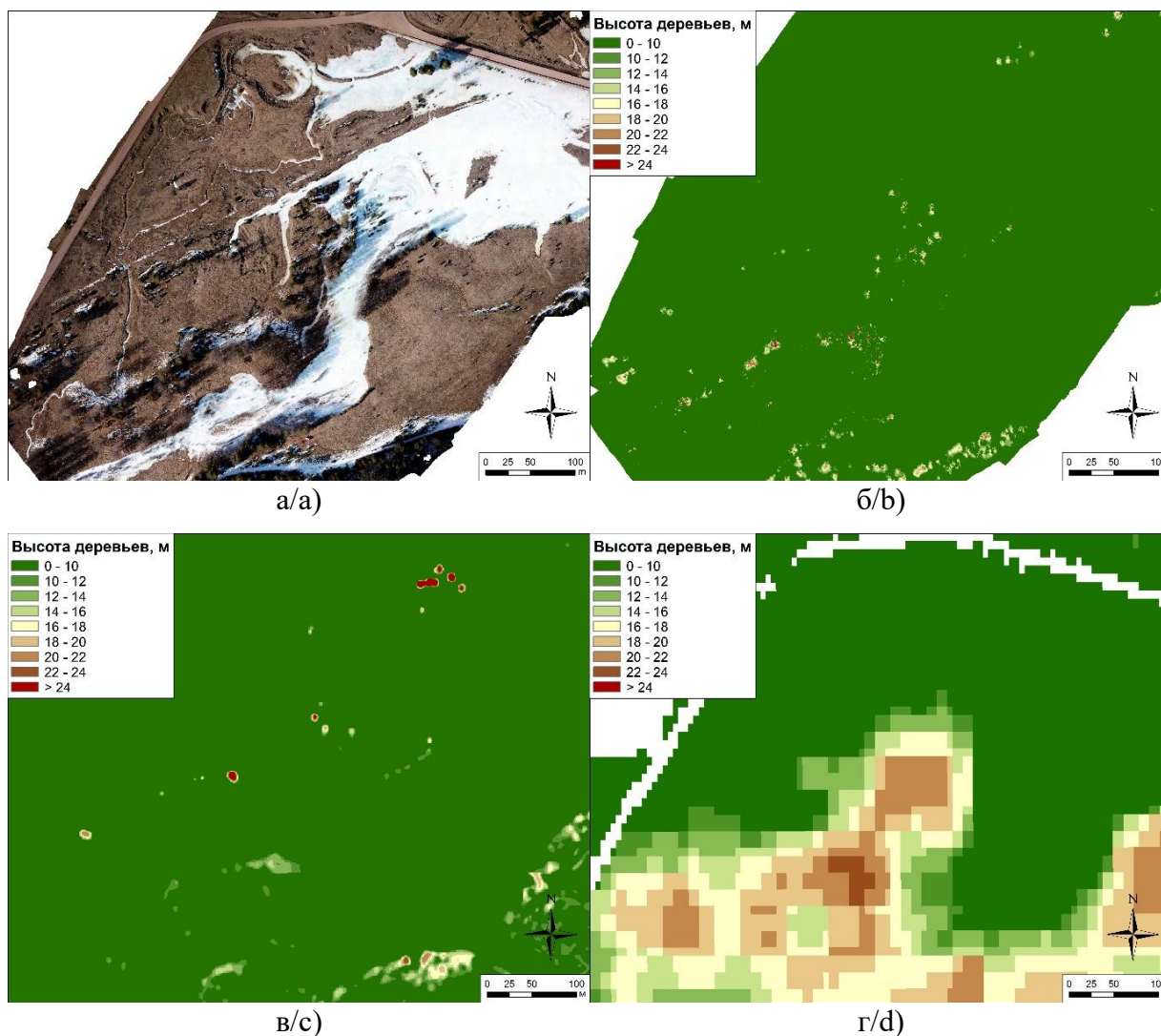


Рис. 4. Наледь в пос. Старая Брянь: а) ортофотоплан; б) высота леса по данным аэрофотосъемки с БПЛА (разрешение 0,1 м); в) высота леса по данным GCHM (разрешение 1 м); г) высота леса по данным ETH (разрешение 10 м)

Fig. 4. Icing in the village of Staraya Bryan: a) orthophotomap; b) forest height according to aerial photography from a UAV (resolution 0.1 m); c) forest height according to GCHM (resolution 1 m); d) forest height according to ETH (resolution 10 m)

Выявлено, что реальная высота древостоя на исследуемом участке не превышает 20 м, что ниже спутниковых оценок: 21 м по данным GFCH и 28 м — ETH (рис. 4г). Данные GCHM имеют хорошее пространственное соответствие с результатами аэрофотосъемки (рис. 4в), однако имеют выраженные погрешности по высоте как в большую (отмечена высота растительности более 37 м при реальной — 16 м), так и в меньшую (14 м при

реальной 20 м) стороны. Отметим, что данные ЕТН ложно показывают наличие лесного покрова вблизи деревьев и не показывают отдельно стоящие группы деревьев и одиночные деревья. Таким образом, данный пример подтверждает необходимость корректировки глобальных и региональных картографических продуктов. Тем не менее, несмотря на погрешности, глобальные данные позволяют определить перспективные территории для создания ключевых дендрохронологических полигонов.

ВЫВОДЫ

В результате работы впервые получена геоинформационная база данных участков леса в пределах наледей в бассейне р. Селенга. По данным ЕТН установлено, что на 65 % наледных полей присутствует лесная растительность. Наибольшая концентрация высокоствольных лесов наблюдается в российской части бассейна, в районах горных хребтов Малый Хамар-Дабан, Курбинский, Цаган-Хуртей и др. Полученные данные позволяют выделить перспективные районы для последующего отбора древесных образцов и организации долгосрочного мониторинга. Планируется провести анализ растительности на наледях с использованием геоботанических карт и полевых данных. Отдельный интерес представляет анализ доступности участков пробоотбора, т. е. близость к дорожной сети, населенным пунктам, при этом важным этапом такой работы является создание актуального тематического слоя проселочных дорог для территории исследования.

Сравнение моделей высот ЕТН и GFCH показало различия в оценках высоты древесного покрова: ЕТН дает завышенные значения, особенно в диапазоне более 22 м. Несмотря на умеренную корреляцию между моделями, данные ЕТН с более высоким разрешением имеют большую пригодность для выявления зон с развитыми лесными сообществами на наледных полях. Одним из перспективных направлений дальнейших исследований является использование данных GCHM с пространственным разрешением 1 м. Доступ к этим данным реализован на текущий момент в Google Earth Engine. Полевая верификация с использованием БПЛА показала, что глобальные карты завышают высоту леса по сравнению с реальными измерениями, однако при этом успешно идентифицируют участки с относительно высокими древесными сообществами, что подтверждает целесообразность применения спутниковых данных для предварительного выделения участков дендрогляциологических исследований.

БЛАГОДАРНОСТИ

Исследование выполнено при поддержке Российского научного фонда, проект № 24-47-03008.

ACKNOWLEDGEMENTS

The study was funded by the Russian Scientific Foundation, project No. 24-47-03008.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алексеев В. Р.* Наледеведение: словарь-справочник. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2007. 438 с.
- Алексеев В. Р.* Криогенез и геодинамика наледных участков речных долин. Геодинамика и тектонофизика, 2015. Т. 6. № 2. С. 171–224. DOI: 10.5800/GT-2015-6-2-0177.
- Алексеев В. Р.* Многолетняя изменчивость родниковых наледей-тарынов. Лед и снег, 2016. Т. 56. № 1. С. 73–92. DOI: 10.15356/2076-6734-2016-1-73-92.

Алексеев В. Р., Макарьева О. М., Шихов А. Н., Нестерова Н. В., Осташов А. А., Землянско-ва А. А. Атлас гигантских наледей-тарынов Северо-востока России. Новосибирск: Издательство Института мерзлотоведения им. П. И. Мельникова СО РАН, 2022. 302 с.

Андреев С. Г., Аюржанаев А. А., Батоцыренов Э. А., Супруненко А. Г., Сам С. А., Содномов Б. В., Черных В. Н. Дендрохронологическое исследование этапного амбара XIX в. (Этнографический музей народов Забайкалья, г. Улан-Удэ). Журнал Сибирского федерального университета. Биология, 2022. Т. 15. № 2. С. 279–292. DOI: 10.17516/1997-1389-0387.

Быков Н. И., Рыгалова Н. В., Шигимага А. А. Дендрохронологический анализ хвойных пород в лавиносборах Северо-Западного Алтая (бассейн р. Коргон). Лед и снег, 2024. Т. 64. № 1. С. 81–95. DOI: 10.31857/S2076673424010066.

Гаврилова М. К. Изменение современного климата области «вечной мерзлоты» в Азии. Обзор состояния и тенденций изменения климата Якутии. Якутск: Издательство ЯФ СО РАН, 2003. С. 13–18.

Гармаев Е. Ж., Христофоров А. В., Цыдыпов Б. З., Аюржанаев А. А., Андреев С. Г., Содномов Б. В., Жамьянов Д. Ц.-Д. Влияние глобального изменения климата на водный сток трансграничной реки Селенги и общие принципы использования ее водных ресурсов. Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление, 2022. № 2. С. 80–94. DOI: 10.35567/19994508_2022_2_7.

Геокриология СССР. Восточная Сибирь и Дальний Восток. М.: Недра, 1989. 515 с.

Гидрогеология СССР. Т. XXII. Бурятская АССР. М.: Недра, 1970. 432 с.

Жарников З. Ю., Дзюба В. В., Мыглан В. С., Вахнина И. Л. К вопросу дендрохронологического датирования каменных сооружений на примере Троицкого собора г. Кяхты. Былые годы, 2022. № 17(4). С. 1721–1732.

Землянскова А. А., Шихов А. Н., Макарьева О. М., Никитина П. А. Закономерности распространения наледей подземных вод, их связь с формированием речного стока и опасных явлений в Магаданской области. Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление, 2025. № 1. С. 57–75. DOI: 10.35567/19994508-2025-1-57-75.

Марков М. Л., Василенко Н. Г., Гуревич Е. В. Наледи зоны БАМ: Экспедиционные исследования. СПб.: Нестор-История, 2016. 320 с.

Николаев А. Н. Дендрохронологические исследования наледей в Центральной Якутии. Лед и снег, 2010. № 1(109). С. 93–102. DOI: 10.5281/zenodo.10255096.

Поморцев О. А., Кашкаров Е. П., Попов В. Ф. Наледи: глобальное потепление климата и процессы наледообразования (Ритмическая основа долгосрочного прогноза). Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова, 2010. Т. 7. № 2. С. 40–48.

Поморцев О. А., Трофимцев Ю. И., Ефремов В. С., Поморцева А. А. Регрессионные модели динамики наледей на основе данных дендроиндикации. Вестник Северо-Восточного федерального университета им. М. К. Аммосова, 2017. № 3(59). С. 58–70.

Ульзетуева И. Д., Гомбоев Б. О. Состояние поверхностных вод бассейна реки Селенги. Природа Внутренней Азии, 2016. № 1. С. 61–68. DOI: 10.18101/2542-0623-2016-1-61-68.

Черных В. Н. Распространение и динамика наледей в Селенгинском среднегорье. Известия Русского географического общества, 2024. Т. 156. № 2. С. 155–168. DOI: 10.31857/S0869607124020055.

Черных В. Н., Гармаев Е. Ж. Мониторинговые исследования наледей в бассейнах малых рек центральной части Селенгинского среднегорья. Проблемы региональной экологии, 2023. № 2. С. 36–41. DOI: 10.24412/1728-323X-2023-2-36-41.

Черных В. Н., Цыдыпов Б. З., Содномов Б. В., Аюржанаев А. А., Жарникова М. А., Гуржапов Б. О., Гармаев Е. Ж. Наледи в бассейне р. Уды (Западное Забайкалье): особенности современного распространения и возможности использования. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, 2024. Т. 335. № 8. С. 161–173. DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4432.

Экологический атлас бассейна озера Байкал. Иркутск: Издательство Института географии им. В. Б. Сочавы СО РАН, 2015. 145 с.

Belokopytova L., Zhirnova D., Kostyakova T., Babushkina E. Dynamics of Moisture Regime and its Reconstruction from a Tree-Ring Width Chronology of *Pinus Sylvestris* in the Downstream Basin of the Selenga River, Russia. Journal of Arid Land, 2018. V. 10. P. 877–891. DOI: 10.1007/s40333-018-0025-y.

Bigio E. R., Swetnam T. W., Baisan C. H., Guiterman C. H., Kisilyakhov Ye. K., Andreev S. G., Batotsyrenov E. A., Ayurzhanayev A. A. The Influence of Land-Use Activities and Regional Drought on Historical Fire Regimes of Buryatia, Siberia. Environmental Research Letters, 2022. V. 17. No. 5. Art. 054043. DOI: 10.1088/1748-9326/ac6964.

Bykov N. I., Rygalova N. V., Shigimaga A. A. Specific Peculiarities of Woody-Tree Radial Growth in Icing Areas of the Altai Mountains. Acta Biologica Sibirica, 2023. V. 9. P. 987–1001. DOI: 10.5281/zenodo.10255096.

Chernykh V., Shikhov A., Ayurzhanayev A., Sodnomov B., Tsydypov B., Zharnikova M., Gurzhapov B., Garmaev E., Dashtseren A. Icings in the Selenga River Basin. Journal of Maps, 2024. V. 20. No. 1. Art. 2340994. DOI: 10.1080/17445647.2024.2340994.

Davi N., Jacoby G., Fang K., Li J., D'Arrigo R., Baatarbileg N., Robinson D. Reconstructing Drought Variability for Mongolia Based on a Large-Scale Tree Ring Network: 1520–1993. Journal of Geophysical Research, 2010. V. 115. Art. D22103. DOI: 10.1029/2010JD013907.

Lang N., Jetz W., Schindler K., Wegner J. D. A High-Resolution Canopy Height Model of the Earth. Nature Ecology & Evolution, 2023. V. 7. P. 1778–1789. DOI: 10.1038/s41559-023-02206-6.

Pederson N., Hessel A. E., Baatarbileg N., Anchukaitis K. J., Di Cosmo N. Pluvials, Droughts, the Mongol Empire, and Modern Mongolia. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2014. V. 111(12). P. 4375–4379. DOI: 10.1073/pnas.1318677111.

Potapov P., Li X., Hernandez-Serna A., Tyukavina A., Hansen M. C., Kommareddy A., Pickens A., Turubanova S., Tang H., Silva C. E., Armston J., Dubayah R., Blair J. B., Hofton M. Mapping and Monitoring Global Forest Canopy Height through Integration of GEDI and Landsat Data. Remote Sensing of Environment, 2020. V. 253. Iss. 4. Art. 112165. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112165.

Tolan J., Yang H. I., Nosarzewski B., Couairon G., Vo H. V., Brandt J., Spore J., Majumdar S., Haziza D., Vamaraju J., Moutakanni T., Bojanowski P., Johns T., White B., Tiede T., Couprie C. Very High-Resolution Canopy Height Maps from RGB Imagery Using Self-Supervised Vision Transformer and Convolutional Decoder Trained on Aerial Lidar. Remote Sensing of Environment, 2024. V. 300. Art. 113888. DOI: 10.1016/j.rse.2023.113888.

Walther M., Batsaikhan V., Dashtseren A., Jambaljav Y., Temujin Kh., Ulanbayar G., Kamp U. The Formation of Aufeis and Its Impact on Infrastructure around Ulaanbaatar, North-Central Mongolia. Exploration into the Biological Resources of Mongolia, 2021. V. 14. P. 385–398.

REFERENCES

- Alekseyev V. R.* Icings Science: A Dictionary and Handbook. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2007. 438 p. (in Russian).
- Alekseyev V. R.* Cryogenesis and Geodynamics of Icing Valleys. *Geodynamics & Tectonophysics*, 2015. V. 6. No. 2. P. 171–224 (in Russian). DOI: 10.5800/GT-2015-6-2-0177.
- Alekseyev V. R.* Long-Term Variability of Spring Icings-Taryns. *Ice and Snow*, 2016. V. 56. No. 1. P. 73–92 (in Russian). DOI: 10.15356/2076-6734-2016-1-73-92.
- Alekseyev V. R., Makaryeva O. M., Shikhov A. N., Nesterova N. V., Ostashov A. A., Zemlyanskova A. A.* Atlas of Giant Icings-Taryns of the North-East of Russia. Novosibirsk: Publishing House of the Melnikov Permafrost Institute of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2022. 302 p. (in Russian).
- Andreev S. G., Ayurzhanaev A. A., Batotsyrenov E. A., Suprunenko A. G., Sat S. A., Sodnomov B. V., Chernykh V. N.* Dendrochronological Study of a Staged Barn of the 19th Century. (Ethnographic Museum of the Peoples of Transbaikalia, Ulan-Ude). *Journal of Siberian Federal University. Biology*, 2022. V. 15. No. 2. P. 279–292 (in Russian).
- Belokopytova L., Zhirnova D., Kostyakova T., Babushkina E.* Dynamics of Moisture Regime and its Reconstruction from a Tree-Ring Width Chronology of *Pinus Sylvestris* in the Downstream Basin of the Selenga River, Russia. *Journal of Arid Land*, 2018. V. 10. P. 877–891. DOI: 10.1007/s40333-018-0025-y.
- Bigio E. R., Swetnam T. W., Baisan C. H., Guiterman C. H., Kisilyakhov Ye. K., Andreev S. G., Batotsyrenov E. A., Ayurzhanaev A. A.* The Influence of Land-Use Activities and Regional Drought on Historical Fire Regimes of Buryatia, Siberia. *Environmental Research Letters*, 2022. V. 17. No. 5. Art. 054043. DOI: 10.1088/1748-9326/ac6964.
- Bykov N. I., Rygalova N. V., Shigimaga A. A.* Specific Peculiarities of Woody-Tree Radial Growth in Icing Areas of the Altai Mountains. *Acta Biologica Sibirica*, 2023. V. 9. P. 987–1001. DOI: 10.5281/zenodo.10255096.
- Bykov N. I., Rygalova N. V., Shigimaga A. A.* Dendrochronological Analysis of Coniferous Species in Avalanche Catchments of North-Western Altai (Korgon River Basin). *Ice and Snow*, 2024. V. 64. No. 1. P. 81–95 (in Russian). DOI: 10.31857/S2076673424010066.
- Chernykh V. N.* Distribution and Dynamics of Icings in the Selenga Middle Mountains. *Izvestiya Russkogo Geograficheskogo Obshchestva (Proceedings of the Russian Geographical Society)*, 2024. V. 156. No. 2. P. 155–168 (in Russian). DOI: 10.31857/S0869607124020055.
- Chernykh V. N., Garmaev E. Zh.* Monitoring Studies of Icings in the Basins of Small Rivers in the Central Part of the Selenga Middle Mountains. *Regional Environmental Issues*, 2023. No. 2. P. 36–41 (in Russian). DOI: 10.24412/1728-323X-2023-2-36-41.
- Chernykh V., Shikhov A., Ayurzhanaev A., Sodnomov B., Tsydypov B., Zharnikova M., Gurzhapov B., Garmaev E., Dashtseren A.* Icings in the Selenga River Basin. *Journal of Maps*, 2024. V. 20. No. 1. Art. 2340994. DOI: 10.1080/17445647.2024.2340994.
- Chernykh V. N., Tsydypov B. Z., Sodnomov B. V., Ayurzhanaev A. A., Zharnikova M. A., Gurzhapov B. O., Garmaev E. Zh.* Icings in the Uda River Basin (Western Transbaikalia): Features of Modern Distribution and Possibilities of Use. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024. V. 335. No. 8. P. 161–173 (in Russian). DOI: 10.18799/24131830/2024/8/4432.

Davi N., Jacoby G., Fang K., Li J., D'Arrigo R., Baatarbileg N., Robinson D. Reconstructing Drought Variability for Mongolia Based on a Large-Scale Tree Ring Network: 1520–1993. *Journal of Geophysical Research*, 2010. V. 115. Art. D22103. DOI: 10.1029/2010JD013907.

Ecological Atlas of the Lake Baikal Basin. Irkutsk: Publishing House of the V. B. Sochava Institute of Geography of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2015. 145 p. (in Russian).

Garmaev E. Zh., Khristoforov A. V., Tsydypov B. Z., Ayurzhanaev A. A., Andreev S. G., Sodnomov B. V., Zhamyanov D. Ts.-D. The Impact of Global Climate Change on the Water Runoff of the Transboundary Selenga River and General Principles of Using its Water Resources. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*, 2022. No. 2. P. 80–94 (in Russian). DOI: 10.35567/19994508_2022_2_7.

Gavrilova M. K. Changes in the Modern Climate of the Permafrost Region in Asia. Review of the State and Trends of Climate Change in Yakutia. Yakutsk: Yakutsk Branch of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2003. P. 13–18 (in Russian).

Geocryology of the USSR. Eastern Siberia and the Far East. Moscow: Nedra, 1989. 515 p. (in Russian).

Hydrogeology of the USSR. V. XXII. Buryat ASSR. Moscow: Nedra, 1970. 432 p. (in Russian).

Lang N., Jetz W., Schindler K., Wegner J. D. A High-Resolution Canopy Height Model of the Earth. *Nature Ecology & Evolution*, 2023. V. 7. P. 1778–1789. DOI: 10.1038/s41559-023-02206-6.

Markov M. L., Vasilenko N. G., Gurevich E. V. Icings of the BAM Zone: Expeditionary Research. St. Petersburg: Nestor-History, 2016. 320 p. (in Russian).

Nikolaev A. N. Dendrochronological Studies of Icings in Central Yakutia. *Ice and Snow*, 2010. No. 1(109). P. 93–102 (in Russian). DOI: 10.5281/zenodo.10255096.

Pederson N., Hessl A. E., Baatarbileg N., Anchukaitis K. J., Di Cosmo N. Pluvials, Droughts, the Mongol Empire, and Modern Mongolia. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2014. V. 111(12). P. 4375–4379. DOI: 10.1073/pnas.1318677111.

Pomortsev O. A., Kashkarov E. P., Popov V. F. Icings: Global Warming and Icings Formation Processes (Rhythmic basis of long-term forecast). *Vestnik of North-Eastern Federal University*, 2010. V. 7. No. 2. P. 40–48 (in Russian).

Pomortsev O. A., Trofimov Yu. I., Efremov V. S., Pomortseva A. A. Regression Models of Icings Dynamics Based on Dendroindication Data. *Vestnik of North-Eastern Federal University*, 2017. No. 3(59). P. 58–70 (in Russian).

Potapov P., Li X., Hernandez-Serna A., Tyukavina A., Hansen M. C., Kommareddy A., Pickens A., Turubanova S., Tang H., Silva C. E., Armston J., Dubayah R., Blair J. B., Hofton M. Mapping and Monitoring Global Forest Canopy Height through Integration of GEDI and Landsat Data. *Remote Sensing of Environment*, 2020. V. 253. Iss. 4. Art. 112165. DOI: 10.1016/j.rse.2020.112165.

Tolan J., Yang H. I., Nosarzewski B., Couairon G., Vo H. V., Brandt J., Spore J., Majumdar S., Haziza D., Vamaraju J., Moutakanni T., Bojanowski P., Johns T., White B., Tiede T., Couprie C. Very High-Resolution Canopy Height Maps from RGB Imagery Using Self-Supervised Vision Transformer and Convolutional Decoder Trained on Aerial Lidar. *Remote Sensing of Environment*, 2024. V. 300. Art. 113888. DOI: 10.1016/j.rse.2023.113888.

Ulzetueva I. D., Gomboev B. O. State of Surface Waters in the Selenga River Basin. *Nature of Inner Asia*, 2016. No. 1. P. 61–68 (in Russian). DOI: 10.18101/2542-0623-2016-1-61-68.

Walther M., Batsaikhan V., Dashtseren A., Jambaljav Y., Temujin Kh., Ulanbayar G., Kamp U. The Formation of Afeis and Its Impact on Infrastructure around Ulaanbaatar, North-Central Mongolia. *Exploration into the Biological Resources of Mongolia*, 2021. V. 14. P. 385–398.

Zemlyanskova A. A., Shikhov A. N., Makaryeva O. M., Nikitina P. A. The Patterns of Spring Afeis Distribution, Their Relation with River Runoff Formation and Hazardous Phenomena in the Magadan Region. *Water Sector of Russia: Problems, Technologies, Management*, 2025. No. 1. P. 57–75 (in Russian). DOI: 10.35567/19994508-2025-1-57-75.

Zharnikov Z. Yu., Dzyuba V. V., Myglan V. S., Vakhnina I. L. On the Issue of Dendrochronological Dating of Stone Structures Using the Example of the Trinity Cathedral in Kyakhta. *Bylye Gody*, 2022. No. 17(4). P. 1721–1732 (in Russian).
