
ЛАНДШАФТЫ И ЭКОСИСТЕМЫ В УСЛОВИЯХ
МЕНЯЮЩЕГОСЯ КЛИМАТА

УДК 519.876.5:551.343(1–924.81/.82)

**ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ
ОЗЕРНЫХ ТЕРМОКАРСТОВЫХ ЛАНДШАФТОВ БОЛЬШЕЗЕМЕЛЬСКОЙ
ТУНДРЫ ДЛЯ ПРОГНОЗА ИХ РАЗВИТИЯ
В УСЛОВИЯХ КЛИМАТИЧЕСКИХ ИЗМЕНЕНИЙ**

© 2024 г. Т. Ю. Зенгина^{1,*}, Г. Г. Осадчая^{2,**}, В. В. Баранов^{1,***}

¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия

²Ухтинский государственный технический университет, Ухта, Россия

*e-mail: tzengina@mail.ru

**e-mail: galgriosa@yandex.ru

***e-mail: bv2000rus@mail.ru

Поступила в редакцию 21.05.2023 г.

После доработки 11.02.2024 г.

Принята к публикации 16.05.2024 г.

На примере Большеземельской тундры рассмотрен опыт прогнозного моделирования термокарстовых проявлений к 2040 г., основанный на платформе Biomod2 и методах ансамблевого моделирования с использованием в качестве входных шести биоклиматических переменных WorldClim, ЦМР SRTM и набора данных о распределении термокарстовых ландшафтов циркумполярной криолитозоны проекта Arctic Circumpolar Distribution and Soil Carbon of Thermokarst Landscapes. Обоснован выбор наиболее значимых для развития термокарста биоклиматических параметров моделирования, предложен алгоритм предподготовки исходных данных. На основе четырех встроенных в Biomod2 алгоритмов проведено ансамблевое моделирование и использован алгоритм SRC. Результаты визуализированы в двух картах. Первая оценивает вероятность образования термокарстовых озерных ландшафтов к 2040 г. Вторая отображает возможную направленность процесса с выделением четырех типов территорий (1 – термокарстовых озер нет и не будет в 2040 г.; 2 – состояние озерных термокарстовых ландшафтов не изменится; 3 – образование озер активизируется; 4 – дренирование и высыхание озер). Анализ карт показал, что частично зона вероятной активизации термокарстовых процессов в 2040 г. сместится к северу и останется наиболее высокой для аazonальных приморских ландшафтов и вдоль нижнего течения р. Печоры. Направленность развития термокарстовых озерных ландшафтов на севере зоны современного сплошного распространения мерзлоты значительно не изменится, однако на юге этой зоны выделяются территории, где термокарстовые озера будут дренированы и превратятся в хасыреи, что приведет к промерзанию приповерхностного талого слоя, формированию слоистой мерзлоты и, несмотря на тренд климатического потепления, увеличению площади мерзлоты. Прогнозируемое появление области активизации термокарста в подзоне островного распространения многолетнемерзлых пород севернее Инты не согласуется с современной геокриологической ситуацией, что очевидно связано с недоучетом геокриологических особенностей региона авторами проекта “Arctic Circumpolar Distribution and Soil Carbon of Thermokarst Landscapes.”

Ключевые слова: Большеземельская тундра, озерные термокарстовые ландшафты, климатические изменения, прогнозное моделирование, ансамблевые методы машинного обучения, нефтяные и газоконденсатные месторождения

DOI: 10.31857/S2587556624030045 EDN: SOLEKE

ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

В настоящее время хозяйственное развитие в пределах Большеземельской тундры, связанное, в первую очередь, с освоением сырьевых ресурсов, сталкивается с целым рядом геоэкологи-

ческих проблем, многие из которых возникают в связи со спецификой северной природы и часто усугубляются современными климатическими трендами, способствующими, в том числе, активизации термокарстовых процессов. Термокарстовые проявления, обусловленные как

современными климатическими изменениями, так и хозяйственным освоением территории, приводят к постепенному изменению площади мерзлых пород (главным образом — к увеличению площадей с несливающимися мерзлыми породами), повышению их температуры и изменению мощности. Все это может создавать серьезные проблемы для дальнейшего успешного осуществления хозяйственной деятельности в регионе.

Одним из наиболее ярких термокарстовых проявлений можно считать изменение состояния и площади термокарстовых озер. Для Большеземельской тундры (БЗТ) обилие таких озер является характерной ландшафтной особенностью и во многом обуславливает специфику тундровых и лесотундровых ландшафтов региона (Кравцова, 2009).

В связи с этим, изучение современной динамики озерных термокарстовых ландшафтов, а также скорости и направленности развития термокарстовых проявлений в их пределах представляется одной из наиболее значимых задач, решение которой может обеспечить принятие оптимальных и экономически обоснованных на сегодняшний день инженерных решений при проектировании и эксплуатации в регионе различных хозяйственных объектов, и, в первую очередь, — объектов нефтегазовой и транспортной инфраструктуры (Зенгина и др., 2011).

Учитывая значительные площади, занятые многолетнемерзлыми породами (ММП) и озерными термокарстовыми ландшафтами (Осадчая и др., 2016), их изучение может достаточно успешно проводиться с использованием ГИС-технологий и методов компьютерного моделирования. Результаты прогнозного моделирования тенденций развития термокарстовых проявлений и сопутствующих проблем мерзлотно-экологического характера в дальнейшем могут быть эффективно использованы для визуализации и анализа ситуации в структуре геоинформационных пакетов для создания соответствующих карт, а также для решения задач приоритизации в принимаемых превентивных мерах в зонах повышенного риска развития термокарстовых процессов в районах хозяйственного освоения территории.

Целью данного исследования являлось выявление обусловленных климатическими изменениями потенциальных зон активизации термокарстовых процессов в районах хозяйственного освоения БЗТ с использованием методов прогнозного геоинформационного моделирования. В задачи работы входило: ознакомление с имеющимся опытом и методиками компьютерного моделирования термокарстовых процессов и выбор наиболее значимых для развития озерных термокарстовых ландшафтов биоклиматических

параметров моделирования; формирование на основе материалов свободного доступа соответствующей базы геопространственных данных, а также выбор и отработка алгоритма их подготовки; опробование предложенной методики моделирования и разработка алгоритма обучения модели. В задачи работы также входило создание по результатам моделирования прогнозных карт развития озерных термокарстовых ландшафтов на 2040 г., определение зон их максимального ожидаемого изменения и сопоставление полученных результатов как с современной геокриологической ситуацией, так и с районами современного и перспективного развития нефтегазового комплекса для выявления месторождений, площади которых максимально подвержены угрозе потенциального риска развития термокарста.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Использованные материалы. Для выбора основных параметров моделирования был проведен анализ литературных источников, который показал, что среди основных природных факторов, влияющих на развитие термокарстовых процессов, наиболее значимыми являются: климатические изменения (изменение прихода тепла и влаги, смена среднегодовой температуры и др.), льдистость пород, растительный покров и его изменения, а также — неотектонические движения и особенности рельефа (Гречищев и др., 1980; Качурин, 1961; Маслов и др., 2005; Тумель, Зотова, 2014; Фельдман, 1984; Шур, 1988).

В работе использовались только открытые данные, доступные для пользователей сети интернет. Ввиду того что результаты моделирования предполагалось в дальнейшем использовать для картографирования, подбирались геопривязанные данные из числа наиболее значимых для развития изучаемого процесса. Из всех проанализированных доступных материалов было решено использовать: 1) набор данных о современном распределении термокарстовых ландшафтов северной циркумполярной криолитозоны; 2) набор биоклиматических переменных, представленных в базе глобальных данных о погоде и климате WorldClim; 3) цифровую модель рельефа SRTM. Рассмотрим их подробнее.

1. Данные о современном распределении термокарстовых ландшафтов в пределах БЗТ были взяты из проекта “Арктическое циркумполярное распределение и почвенный углерод термокарстовых ландшафтов” (Arctic Circumpolar Distribution and Soil Carbon of Thermokarst Landscapes) (Olefeldt et al., 2016). Материалы проекта представлены в виде векторных данных на сайте Центра распределенных активных архивов Ок-Риджской национальной лаборатории, входящей в струк-

туру Центра системы данных и информации системы наблюдения за Землей НАСА (<https://daac.ornl.gov/about/>). В рамках названного проекта термокарстовые ландшафты определяются как “ландшафты, где термокарстовые проявления в настоящее время присутствуют или могут развиваться”. Помимо оценки содержания органического углерода в почве в наборе представлена территориальная оценка трех типов термокарстовых ландшафтов (озерных, водно-болотных и склоновых) по состоянию на 2015 г. Нами была в первую очередь использована информация по термокарстовым озерным ландшафтам, соответствующая столбцу атрибутивной таблицы слоя TKThLP (Lake thermokarst terrain coverage). Кроме того, в проекте все термокарстовые ландшафты оценены по уровню регионального охвата термокарстовыми проявлениями и разделены по этому критерию на 5 классов: 1) Very High – очень высокий уровень (60–100% регионального охвата); 2) High – высокий (30–60%); 3) Moderate – средний (10–30%); 4) Low – низкий (1–10%); 5) None – нулевой (0–1%).

Важным аргументом в пользу выбора именно этого набора данных послужил тот факт, что региональное распространение термокарстовых ландшафтов в рамках этого проекта было получено на основе моделирования с использованием 6 слоев пространственных циркумполярных данных, описывающих ключевые характеристики ландшафта: районирование вечной мерзлоты (островное, спорадическое, прерывистое или непрерывное), содержание грунтового льда (<10%, 10–20% или >20%), толщина осадочных пород, наземный экорегион (бореальный или тундровый), рельеф местности (плоский, холмистый, холмистый или горный/неровный) и ландшафтный охват (<10%, 10–30% или >30%). В результате пересечения этих слоев был получен один полигональный слой в виде шейп-файла (shp), содержащий более 130 тыс. полигонов (Olefeldt et al., 2016).

Использование именно этого набора данных фактически обеспечило косвенное включение в моделирование ряда таких природных факторов, влияющих на развитие термокарстовых процессов, которые не могли быть использованы нами при моделировании напрямую в силу отсутствия в свободном доступе иных геопривязанных данных такой детальности и содержания на столь обширную территорию.

От особенностей распространения ММП (островного, спорадического, прерывистого или непрерывного) зависит сам процесс развития термокарста. Например, озерные термокарстовые ландшафты сосредоточены в основном в северной части криолитозоны, где распространение многолетней мерзлоты имеет сплошной характер. Содержание грунтового

льда (льдиистость пород) определяет распространение термокарстовых форм рельефа. Так, чем выше льдиистость, тем на территории более широко распространены формы рельефа, имеющие термокарстовый генезис. Тип растительности (бореальный или тундровый) может рассматриваться как дополнительный фактор развития процесса, являясь индикатором геоэкологической зональности. Так, наличие древесной растительности сдерживает развитие термокарста. В свою очередь современный ландшафтный охват территории термокарстовыми проявлениями (<10%, 10–30% или >30%) определяет возраст термокарста, степень его зрелости и, следовательно, потенциал дальнейшего развития. Таким образом, использование описанных данных Ок-Риджской лаборатории обеспечило косвенное включение ряда достаточно значимых предикторов развития термокарста в моделирование.

II. Набор биоклиматических переменных, представленных в базе глобальных данных о погоде и климате WorldClim – это геопривязанные растровые картографические материалы о погодных и климатических показателях высокого разрешения по всему миру, представленные группами по моделированию климата, а также Федерацией сетей системы Земли (ESGF) на сайте worldclim.org. Представлено 2 типа данных – для так называемых исторических условий (т.е. близких к текущим) и для будущих (спрогнозированных) условий.

Текущие (исторические) климатические данные WorldClim версии 2.1 (v2) относятся к 1970–2000 гг. и стали доступны с января 2020 г. Они формировались при поддержке гранта от Feed the Future Консорциума геопространственных и сельскохозяйственных систем Лаборатории инноваций в области устойчивой интенсификации (Fick and Hijmans, 2017; Ziehn et al., 2019).

Будущие (т.е. спрогнозированные) климатические данные представляют собой прогнозы климата CMIP6 (Coupled Model Intercomparison Projects/Проекты взаимного сравнения связанных моделей). CMIP6 представляет собой существенное расширение по сравнению с CMIP5 с точки зрения количества участвующих групп моделирования и количества рассмотренных будущих сценариев. Для 23 глобальных климатических моделей были обработаны переменные самой низкой температуры, максимальной температуры и осадков за каждый месяц. Расчет также проводился и для четырех общих сценариев социально-экономического развития человечества SSP (socioeconomic pathways): 126, 245, 370 и 585. В нашей работе использовался сценарий SSP-126 с низким радиационным воздействием к концу века, который представляет собой нижний предел диапазона вероятных будущих путей

развития и отображает “лучший вариант” будущего с точки зрения устойчивого развития. Месячные значения были рассчитаны как средние значения за 20 лет для разных периодов: 2021–2040, 2041–2060, 2061–2080, 2081–2100 гг. В работе были использованы спрогнозированные данные на период 2021–2040 гг.

Биоклиматические данные являются важнейшими факторами зонального ряда, влияющими на развитие термокарста. В рассмотренном наборе данных приводятся 19 биоклиматических переменных. Нами были выбраны 6 из них. Термокарст относят к процессам летнего ряда. Его развитие определяется изменением прихода тепла и влаги как в среднегодовом цикле, так и особенно для летнего периода. Следовательно, для термокарста важны параметры, характеризующие теплый период (максимальная и средняя температура самого теплого месяца, температура и осадки самого теплого квартала), а также годовой диапазон температуры, годовое количество осадков и среднегодовая температура. Поэтому из всех биоклиматических переменных были выбраны 6: BIO1 – среднегодовая температура; BIO5 – максимальная температура самого теплого месяца; BIO7 – годовой диапазон температуры (разница между BIO5 – максимальной температурой самого теплого месяца и BIO6 – минимальной температурой самого холодного месяца); BIO10 – средняя температура самого теплого квартала; BIO12 – годовое количество осадков; BIO18 – осадки самого теплого квартала. Данные доступны в четырех пространственных разрешениях – от 30 с до 10 мин и представлены в формате GeoTiff (.tif). Нами в работе были использованы данные с разрешением 10 и 2.5 мин.

III. В качестве цифровой модели рельефа (ЦМР) использовались находящиеся в открытом доступе данные SRTM, полученные с помощью Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) и агрегированные до 30 угловых секунд.

Включение рельефа (как значимого регионального фактора) для моделирования развития термокарстовых процессов необходимо, поскольку рельеф во многом определяет условия увлажнения и направление развития термокарстовых проявлений, их затухание или активизацию. Влияние рельефа проиллюстрируем на следующих примерах. Например, слабонаклонная поверхность (крутизной менее 1°) способствует развитию термокарста, тогда как на плоской поверхности (т.е. без выраженного уклона) происходит быстрое затухание термокарстовых процессов после их начала, поэтому на таких поверхностях образование озер маловероятно. Более возвышенные участки характеризуются меньшей мощностью снежного покрова, что способствует большему охлаждению грунтов и стабилизации мерзлотных условий.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Вопросам возможности использования компьютерного моделирования для изучения и прогнозирования развития термокарстовых процессов в последние годы посвящено много работ как отечественных, так и зарубежных. При этом многие авторы указывают на сложность реализации такого типа исследований, так как моделирование процесса термокарста осложняется отсутствием на сегодняшний день единой математической модели термокарста, описывающей процесс с момента его зарождения до затухания, а также тесной взаимосвязью инженерно-геокриологических процессов между собой (Хабибуллин и др., 2007).

Проведенный анализ публикаций показал, что российский опыт подобных исследований в большей степени основан на классическом вероятностном подходе к моделированию (Викторов и др., 2019; Капралова и др., 2013; Кирикова, Осадчая, 1998; Полищук и др., 2013), а в зарубежных публикациях отмечается тенденция более широкого использования методов компьютерного моделирования, основанных на алгоритмах машинного обучения (Huang et al., 2018; Nitze et al., 2020; Yin et al., 2021). Наиболее интересными показались работы, реализующие прогнозное моделирование на основании сразу нескольких алгоритмов машинного обучения с их последующим объединением для множественного ансамблевого моделирования. Такой подход, например, был реализован в 2021 г. в работе китайских специалистов, посвященной моделированию на основе машинного обучения подверженности термокарстовым оползням региона вечной мерзлоты на Тибетском нагорье (Yin et al., 2021). Алгоритмы машинного обучения были реализованы ими в программной среде R на базе платформы Biomod2, а результаты затем были перенесены в ГИС-пакет ArcGIS для построения прогнозных карт. Этот подход и был взят нами за основу при разработке алгоритма прогнозного моделирования термокарстовых проявлений к 2040 г. в пределах БЗТ.

Компьютерная платформа для моделирования Biomod2 представляет собой обновленную версию пакета BIOMOD, который изначально был предназначен для ансамблевого прогнозирования распределения видов с помощью нескольких методов в различных условиях окружающей среды. BIOMOD реализован в среде R и представляет собой бесплатный пакет с открытым исходным кодом. Обновленная версия Biomod2 предлагает возможность запуска сразу 10 современных методов моделирования для описания и прогнозирования отношения между видом и средой его обитания. Пакет разработан в основном для решения задач в сфере экологии,

однако, как и BIOMOD, может и достаточно широко используется для моделирования практически любых данных в зависимости от любых связанных и определяющих их переменных (Thuiller et al., 2009; Yin et al., 2021).

Учитывая особенности набора использованных нами материалов, которые включали как векторные, так и растровые данные, в качестве базового программного обеспечения также использовались: 1) свободная геоинформационная система QGIS3.16.4 with GRASS7.8.5 с открытым кодом, в которой проводилась подготовка векторных и растровых слоев для моделирования, проводились все расчеты, а потом осуществлялась картографическая визуализация результатов моделирования; 2) программное обеспечение Jupyter Notebook для интерактивных вычислений с использованием языка программирования Python 3.9; 3) программная среда разработки R-Studio (R4.1.1) с установленной платформой Biomod2, в которой проводилось моделирование.

Алгоритм прогнозного моделирования развития термокарстовых проявлений в пределах БЗТ на 2040 г. включал два этапа (Zengina et al., 2023). Первый – отработка методики на материалах с низким пространственным разрешением в 10 мин, в рамках которого осваивалась алгоритмы машинного обучения для обработки разнотипных данных (векторных, табличных, растровых). Второй – процесс итогового прогнозного моделирования, который осуществлялся по уже опробованной методике на данных более высокого разрешения в 2.5 мин.

Вначале исходные растровые слои с биоклиматическими данными, растровый слой SRTM и векторный слой с данными о современном распространении термокарстовых ландшафтов (по версии проекта “Arctic Circumpolar Distribution and Soil Carbon of Thermokarst Landscapes”), были обрезаны в программе QGIS-3.16 по границе района исследования.

Далее для удобства последующей работы при загрузке данных в R-Studio, полигональный слой Circumpolar_Thermokarst_Landscapes был преобразован в точечный слой. Для данных с разрешением 2.5 мин алгоритма создания центроидов на каждый отдельно взятый полигон оказалось недостаточно, и поэтому был использован алгоритм создания случайных точек. Создание 25 точек на каждый полигон при загрузке данных в R-Studio обеспечило покрытие территории в 90%. После того как для каждой точки полученного слоя были определены и добавлены координаты, слой был сохранен в табличном формате CSV (comma-separated values). Далее в среде разработки Jupyter Notebook из таблицы были удалены все лишние данные и оставлена только информация о наличии термокарстовых

проявлений, а также данные о координатах. Для этого данные таблицы были переведены в формат boolean (true/false), т.е. в формат, указывающий присутствует ли в данной точке природное явление, или отсутствует. Использовались значения колонки ‘TKThLP’, которые были преобразованы исходя из пяти значений, соответствующих разным уровням регионального охвата термокарстовыми ландшафтами (Very High, High, Moderate, Low, None). Если значение было ‘None’, то оно приравнялось к нулю, все остальные – к единице. После этого были удалены все позиции с нулевыми значениями. Таким образом, был получен и окончательно сохранен преобразованный табличный файл в формате CSV с данными о распространении термокарстовых озер.

Следующим необходимым этапом работы была проверка выбранных для процесса моделирования параметров на мультиколлинеарность с помощью коэффициента Пирсона. Мультиколлинеарность отрицательно влияет на результаты моделирования и на обучение моделей. Анализ корреляционной матрицы Пирсона между биоклиматическими переменными и переменной высоты (elevation) показал, что есть положительная корреляция ≥ 0.9 между BIO5 и BIO10, а также между BIO18 и BIO12, что говорит о наличии мультиколлинеарности. Существует несколько методов борьбы с этим явлением, одним из которых является стандартное удаление одного из признаков. Однако Biomod2, на базе которого будет осуществляться моделирование, предлагает выбор из нескольких алгоритмов машинного обучения, одним из которых является RF (random forest), который считается алгоритмом, устойчивым к мультиколлинеарности (Breiman, 2001). Эту проблему решает также и ансамблевое моделирование.

Далее полученный и загруженный в R-Studio слой с данными о распространении термокарстовых озер был использован для обучения модели (Zengina et al., 2023). Из всех возможных встроенных в Biomod2 алгоритмов машинного обучения были выбраны четыре: обобщенная линейная модель (GLM), обобщенная аддитивная модель (GAM), обобщенный метод бустинга (GBM), случайный лес (RF). Последние два являются методами ансамблевого моделирования и объединяют множество деревьев классификации для формирования единой модели с повышенной точностью прогнозирования. Выбранные алгоритмы машинного обучения хорошо работают с подобного рода природными данными, что подтверждается в публикациях многих исследователей (Guisan et al., 2017; Nitze et al., 2020; Wood, 2011; Yin et al., 2021). Для каждого алгоритма были настроены индивидуальные стандартные параметры, количество основных

прогнозов было установлено равным двум. Рассчитанные метрики эффективности каждого из четырех алгоритмов машинного обучения показали, что лучше всего сработал алгоритм RF (random forest) ввиду его устойчивости к мультиколлинеарности. Проведенная после этого оценка природных факторов показала, что все они в большинстве случаев действительно оказывают влияние на развитие термокарстовых процессов. Например, по большинству алгоритмов (кроме RF) такие природные факторы, как BIO18 (осадки самого теплого квартала) и elev (высота), оказались влияющими в более чем 50% случаев.

Для усовершенствования результатов работы всех алгоритмов было также проведено ансамблевое обучение (ensemble learning), которое обеспечивает получение более высокой прогностической эффективности и учитывает преимущества каждого отдельного алгоритма модельного обучения, которое оно объединяет (Kuncheva et al., 2003; Opitz et al., 1999). В нашем случае для ансамблевого обучения были выбраны все использованные модели, поскольку у всех значения метрики TSS (true skill statistics) больше 0.6.

Далее для создания математической проекции прогнозируемой ситуации 2040 г. был использован растровый слой, содержащий 19 биоклиматических переменных, соответствующих будущему климату, спрогнозированному на 2040 г. в рамках проекта CMIP6 по сценарию ssp126 (Ziehn et al., 2019). В R-Studio этот слой был разделен на 19 отдельных растровых слоев, соответствующих 19 биоклиматическим переменным. Из них были выбраны только растры с теми же биоклиматическими переменными, которые до этого использовались для обучения модели (BIO1, BIO5, BIO7, BIO10, BIO12, BIO18). В качестве растра, описывающего гипсометрические параметры территории, был использован тот же файл elevation_data. Полученный на основе математического ансамблевого моделирования результат пространственного прогнозирования термокарстовых проявлений может интерпретироваться как расчет вероятности образования термокарстовых озер в 2040 г., выраженной в процентах.

Следующим шагом стало определение изменений распространения термокарстовых проявлений к 2040 г. на основании алгоритма SRC (species range change), встроенного в функцию BIOMOD_RangeSize, который определяет изменение пределов распространения природного явления (Thuiller et al., 2014). Для расчета использовались прогнозы динамики термокарстовых озерных ландшафтов на 2040 г., созданные по результатам ансамблевого моделирования (по характеристикам са – commute average и wm – weighted mean) (Zengina et al., 2023). После отработки алгоритма был получен растро-

вый файл со значениями: –2 (lost), –1 (pres), 0 (abs), 1 (gain). Интерпретация этих значений соответствует четырем типам территорий с разной направленностью развития термокарстовых озерных ландшафтов: 1) территории, где термокарстовых проявлений нет сейчас и не будет в 2040 г. (abs); 2) где они будут протекать без изменений по сравнению с современной ситуацией (pres); 3) где они будут активизироваться (gain); 4) где они будут угасать (lost).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты, полученные при моделировании, были перенесены в геоинформационный пакет QGIS и оформлены как две прогнозные карты: карта вероятности развития термокарстовых озерных ландшафтов в 2040 г. (рис. 1) и карта направленности развития термокарстовых озерных ландшафтов в 2040 г. (рис. 2).

Полученные прогнозные карты методом наложения слоев в ГИС были сопоставлены с современной геокриологической картой БЗТ, представленной в работах российских исследователей (Осадчая, Зенгина, 2012; Осадчая, Пижанкова, 2023; Осадчая и др., 2015) и основанной на классификации геокриологических зон В.Н. Достовалова и В.А. Кудрявцева (1967), а затем сопоставлены с картографическим представлением векторного слоя распространения современных озерных термокарстовых ландшафтов проекта “Arctic Circumpolar Distribution and Soil Carbon of Thermokarst Landscapes” (Olefeldt et al., 2016), который был использован для обучения модели.

Сравнение прогнозируемой и современной ситуации показало следующее. Вероятность развития термокарстовых процессов в 2040 г. останется наиболее высокой на севере БЗТ в пределах азональных приморских ландшафтов и вдоль нижнего течения р. Печоры, где и в настоящее время отмечается максимальная плотность проявления таких процессов, как термокарст и термоабразия. На востоке–юго-востоке БЗТ к 2040 г. появится новая область, протянувшаяся к северу от города Инты от южной тундры до крайнесеверной тайги, где по прогнозным расчетам вероятность развития термокарстовых процессов может составить 70–80%. Однако в настоящее время в этом регионе, в соответствии с работами российских исследователей, этот показатель очень незначителен, поскольку территория относится к бореальному экорегиону и приходится на район не сплошного, а островного распространения ММП (Осадчая и др., 2015; Ророва et al., 2005). Острова ММП существуют здесь в массивах бугристых торфяников и приурочены к буграм, тогда как межбугровые понижения преимущественно талые. Таким образом, прогнозируемое активное развитие

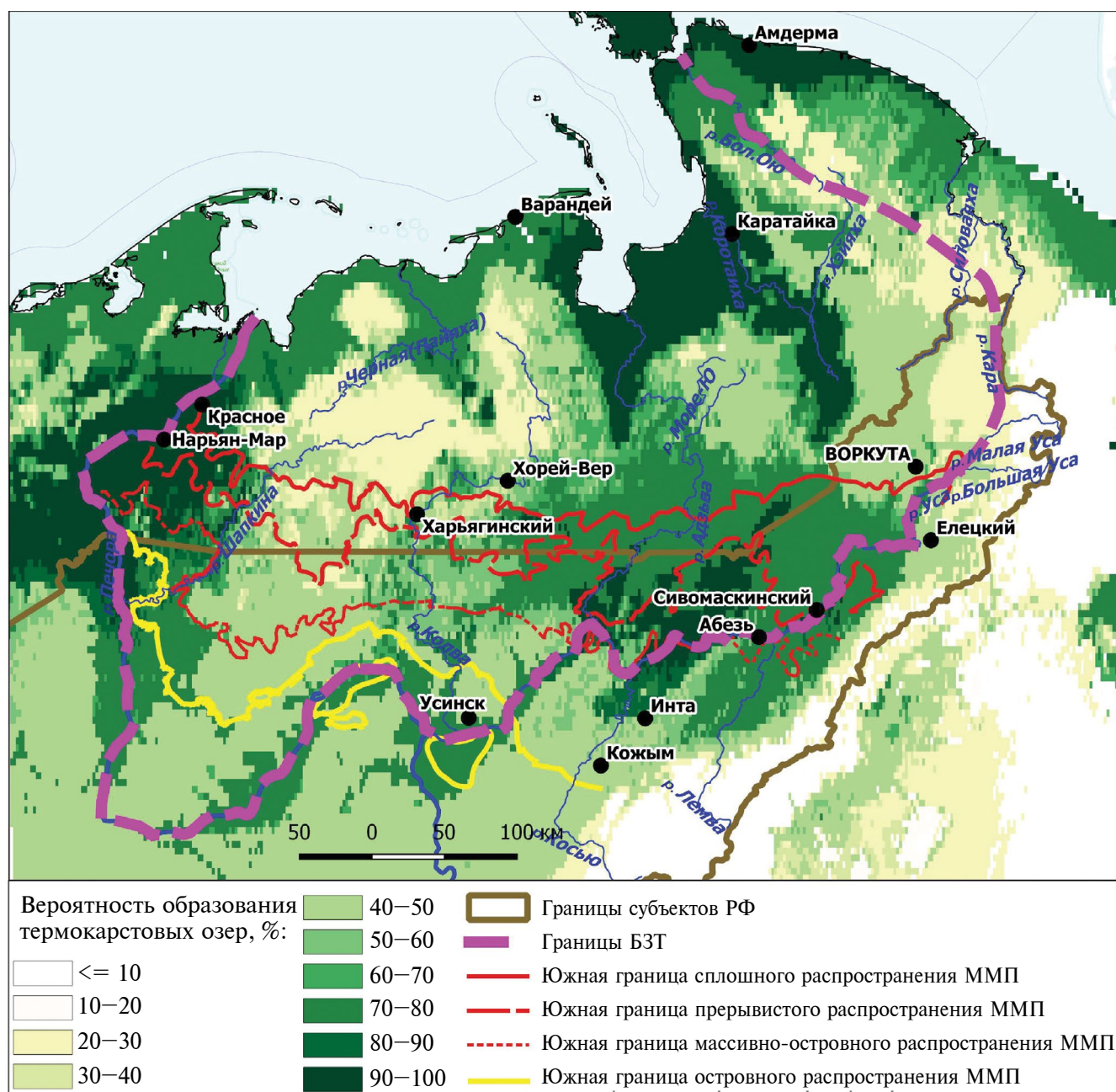


Рис. 1. ГИС-визуализация результатов ансамблевого прогнозирования вероятности развития термокарстовых озерных ландшафтов в 2040 г.

озерных термокарстовых ландшафтов в зонах современного островного, а также массивно-островного распространения ММП не вполне согласуется с существующей в представлении российских исследователей геоэкологической обстановкой.

Подобное несоответствие, по всей видимости, связано с тем, что подходы к картографированию геоэкологической зональности российских и зарубежных исследователей для изучаемого региона, а также представления о современных границах криолитозоны существенно отличаются. Так, при создании слоя термокарстовых ландшафтов северной бореальной и тундровой циркумполярной области распро-

странения ММП большая часть рассматриваемой территории была отнесена зарубежными исследователями (Olefelt et al., 2016) к зоне прерывистого распространения ММП с очень широким диапазоном современного уровня покрытия территории озерными термокарстовыми ландшафтами от 10 до 90%. Такой подход очевидно соответствует классификации, предложенной в 1990-е годы Дж. Брауном (Brown et al., 1997), которую, по мнению российских мерзлотоведов, можно считать слишком общей для Европейского северо-востока России и слабо отражающей специфику региональных причинно-следственных связей в системе климат–вечная мерзлота в пределах БЗТ. В тоже время при создании со-

временной геокриологической карты БЗТ использовалась традиционная для российского мерзловедения классификация геокриологической зональности (Достовалов, Кудрявцев, 1967; Общее ..., 1974), согласно которой бореальная часть БЗТ (подзона южной лесотундры) относится российскими специалистами к зоне массивно-островного распространения ММП, где преобладают участки без мерзлоты, а следовательно на большей части территории практически отсутствуют природные (мерзлотные) предпосылки для формирования термокарстовых озер. По-разному также проводится российскими и зарубежными исследователями южная граница криолитозоны региона. Таким образом, расхождения в интерпретации особенностей современной геокриологической обстановки, заложенные во входные данные моделирования (Olefelt et al., 2016), с представлениями российских мерзловедов привели к появлению спорных результатов прогнозирования вероятности развития термокарстовых проявлений для ряда участков в пределах зоны массивно-островного и островного распространения ММП.

Интересным представляется также рассмотрение *результатов моделирования направленности развития термокарстовых озерных ландшафтов* на базе Biomod2 (алгоритм SRC — species range change) (см. рис. 2) с современной геокриологической картой БЗТ.

Фактически вся зона *современного сплошного распространения* по результатам моделирования на 2040 г. попадает либо в стабильную зону, где термокарстовые проявления будут протекать без изменений по сравнению с современной ситуацией, либо в зону, где будут протекать процессы дренирования и высыхания термокарстовых озер. Во втором случае при активизации процесса дренирования уже сформированных термокарстовых озер они будут превращаться в хасыреи (спущенные озера). Как только почти вся вода из хасырея уходит, как правило, с поверхности начинается процесс многолетнего промерзания. Это приводит к развитию процессов многолетнего пучения и постепенному промерзанию приповерхностного талого слоя, т.е. к формированию слоистой мерзлоты (Осадчая, 2021; Шполянская и др., 2022). Таким образом, несмотря на тренд климатического потепления, площадь мерзлоты с поверхности будет увеличиваться. Это может представлять угрозу для объектов нефтегазовой инфраструктуры. Случаи разрыва трубопроводов, проходящих по подобным участкам, уже отмечались на юго-востоке этой зоны.

На юг от современной границы сплошного распространения ММП согласно результатам моделирования территория фактически разбивается на 4 фрагмента.

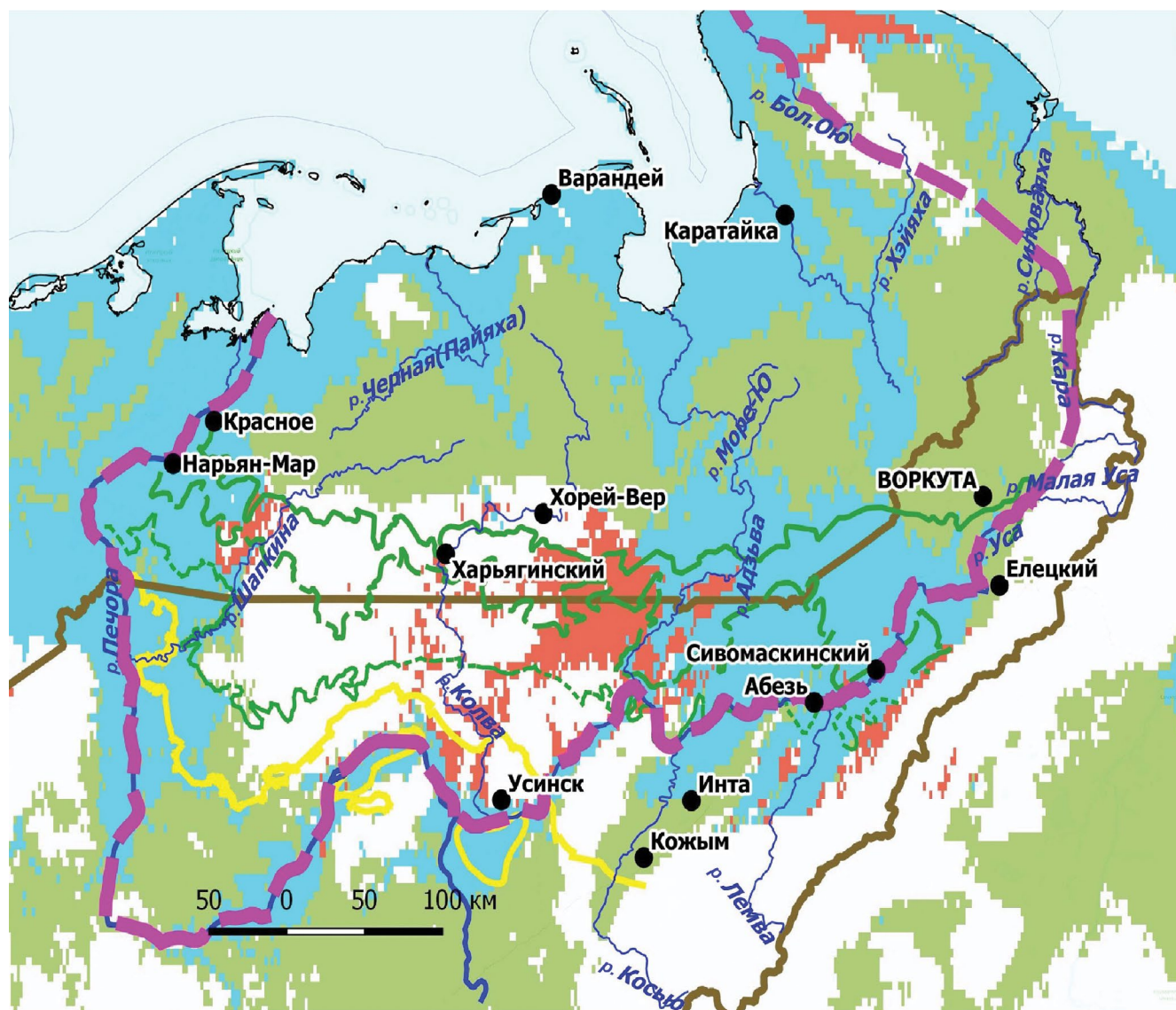
1. На востоке прогнозируется стабильное состояние без существенных изменений по сравнению с современной ситуацией.

2. На самом западе вдоль р. Печоры выделяется небольшой участок, где развитие термокарстовых процессов будет тоже протекать стабильно, т.е. так же, как и в настоящее время.

3. Восточнее, в пределах центральной части Большеземельского (Земляного) хребта в пределах северной лесотундры и более северных участков уже в южной тундре (сплошное распространение ММП), выделяется участок, где, как и в настоящее время, прогнозируется отсутствие процесса образования термокарстовых озер.

4. В центральной части прогнозируется небольшая зона возможного образования новых термокарстовых озер, захватывающая территории современной зоны сплошного распространения ММП (очень небольшой фрагмент), прерывистого и массивно-островного распространения ММП. По всей видимости, процессы увеличения степени заозеренности вполне возможны в зоне сплошной мерзлоты в полигональных торфяниках, так как таяние жильных льдов при потеплении приведет к термокарстовым просадкам и образованию озер (Shpolyanskaya, 2021). В зоне прерывистой мерзлоты незначительный рост площади озер может наблюдаться для уже существующих термокарстовых озер. Однако в зоне массивно-островного распространения ММП образование новых термокарстовых озер маловероятно, как и в пределах небольших выделившихся участков островного распространения мерзлоты.

Таким образом, можно предположить, что к 2040 г. наибольшую опасность с точки зрения хозяйственного освоения территории могут представлять районы в пределах зоны современного сплошного распространения ММП, где по результатам моделирования в 2040 г. прогнозируется дренирование и высыхание термокарстовых озер и, следовательно, формирование хасыреев. Проблемы могут возникать в связи с тем, что освоение территории в подзоне сплошной мерзлоты ориентируется на результаты предварительно проведенных инженерно-геологических изысканий. На момент изысканий под свежими хасырями при бурении до 10–12 м фиксируются талые породы. Соответственно, эти площади могут быть задействованы под строительство именно как талые участки. Через 10–15 лет, при прогнозируемом дренировании озер и формировании хасыреев, на этих участках могут начать развиваться процессы многолетнего пучения и промерзания грунтов. В результате, сооружения (как правило, линейные) могут прийти в негодность. Так, межпромысловые или внутрпромысловые нефтепроводы могут быть деформированы или разрушены, что может при-



Изменение распространения
термокарстовых озер к 2040 г. (алгоритм SRC)

- 2 (lost — дренирование и высыхание)
- 1 (pres — стабильное состояние без изменений)
- 0 (abs — отсутствие раньше и в 2040 г.)
- 1 (gain — образование новых в 2040 г.)
- Границы субъектов РФ
- Граница БЗТ
- Южная граница сплошного распространения ММП
- Южная граница прерывистого распространения ММП
- Южная граница массивно-островного распространения ММП
- Южная граница островного распространения ММП

Рис. 2. ГИС-визуализация результатов моделирования направленности развития термокарстовых озерных ландшафтов на базе Biomod2 с использованием алгоритма SRC (species range change).

водить к разливам нефти, ее попаданию на поверхность и далее в гидросеть. Подобные варианты развития событий уже имели место.

Сравнение результатов моделирования с *районами современного и перспективного развития нефтегазового комплекса* позволило выявить месторождения, максимально подверженные угрозе потенциального риска развития термокарста. Для этого специально подготовленный векторный слой, отражающий размещение и стадию освоения нефтяных и газоконденсатных месторождений БЗТ, был сопоставлен методом оверлея в ГИС QGIS с результатами моделирования. Результаты сопоставления были введены в атрибутивную таблицу слоя месторождений как принадлежность каждого из месторождений к той или иной зоне. Расчет числа месторождений разной стадии освоения в пределах зон разной направленности развития термокарстовых проявлений представлен в табл. 1.

Анализ карт и расчетной таблицы показал, что почти половина месторождений находится в пределах территорий, где хозяйственное освоение без особых мер предосторожности в будущем может приводить к неблагоприятным последствиям (Природные ..., 2000). Так, в районах возможного дренирования термокарстовых озер и превращения их в хасыреи находится более 26% всех месторождений. Около 20% всех месторождений находится в зонах возможной активизации термокарстовых проявлений и формирования новых озер. Причем большая часть месторождений, находящихся в зонах опасных для хозяйственного освоения, относится к категории разрабатываемых в настоящее время, планируемых или подготовленных к разработке.

Среди крупнейших эксплуатируемых месторождений, располагающихся в опасных для хозяйственного освоения зонах, следует отметить следующие, находящиеся в зоне возможного дренирования термокарстовых озер и образования хасыреев: Лавоажское, им. А.Н. Титова, Инзырейское и Ярейюское. В зонах возможной

активизации термокарстовых процессов и формирования новых озер расположены такие крупнейшие эксплуатируемые месторождения, как Сандивейское-I, Харьягинское и Северо-Мусюршорское. Все перечисленные месторождения располагаются в зонах сплошного и прерывистого распространения ММП согласно классификации В.Н. Достовалова и В.А. Кудрявцева (1967).

Таким образом, согласно полученным результатам прогнозного моделирования в 2040 г. в пределах БЗТ из 121 месторождения, находящихся сейчас на разных стадиях освоения, порядка 20 могут оказаться в зоне активизации термокарстовых проявлений и появления новых термокарстовых озер, а 32 попадают в зону, для которой будет характерно дренирование озерных термокарстовых ландшафтов, обсыхание озер и формирование хасыреев. В числе этих месторождений находятся крупнейшие на сегодняшний день нефтяные и газоконденсатные месторождения Европейской территории России.

Участки активизации термокарстовых проявлений, попадающие по результатам моделирования в пределы зон массивно-островного и островного распространения ММП, угрозы для хозяйственной инфраструктуры не представляют, поскольку в соответствии с существующей в представлении российских исследователей геокриологической обстановкой характеризуются отсутствием природных (мерзлотных) предпосылок для формирования термокарстовых озер.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Пространственно-временное прогнозное моделирование развития озерных термокарстовых ландшафтов на основе биоклиматических параметров с использованием метода ансамблевого машинного обучения на базе компьютерной платформы моделирования Biomod2 по-

Таблица 1. Расположение месторождений БЗТ в пределах зон прогнозируемого изменения термокарстовых озерных ландшафтов

Стадия освоения месторождения	Месторождения БЗТ (в числителе – общее число месторождений, в знаменателе – % от общего числа месторождений)			
	в эксплуатации	разведываемые	подготовленные к разработке	непромышленные или списанные
Зона прогнозируемого изменения термокарстовых озерных ландшафтов				
Дренирования и высыхания озер	17/25.37	15/31.91	0/0.00	0/0.00
Без изменений современного состояния	18/26.87	9/19.15	1/33.33	1/25.00
Образования новых озер	15/22.39	7/14.89	1/33.33	1/25.00
Отсутствие озер сейчас и в 2040 г.	14/20.90	11/23.40	1/33.33	1/25.00
Отсутствие данных	3/4.48	5/10.64	0/0.00	1/25.00

звоило получить результаты, пригодные для их дальнейшей визуализации и анализа в структуре геоинформационных пакетов, а также для создания соответствующих прогнозных карт регионального уровня.

Полученные карты в дальнейшем могут использоваться для оценки вероятности и направленности развития обусловленных климатическими изменениями термокарстовых проявлений на региональном уровне, а также для выявления и анализа потенциально возможных сопутствующих проблем мерзлотно-экологического характера и зон активизации термокарстовых процессов в районах хозяйственного освоения.

Так, анализ полученных на примере БЗТ результатов моделирования показал, что вероятность развития термокарстовых процессов в 2040 г. останется наиболее высокой в пределах азональных приморских ландшафтов на севере и вдоль нижнего течения р. Печоры. Предположительно, зона вероятной активизации термокарстовых проявлений частично сместится к северу. На севере зоны современного сплошного распространения мерзлоты к 2040 г. направленность развития термокарстовых озерных ландшафтов существенно не изменится. Однако на некоторых участках в ее южной части возможна активизация процессов дренирования термокарстовых озер и превращения их в хасыреи, что приведет к промерзанию приповерхностного талого слоя, формированию слоистой мерзлоты и, несмотря на тренд климатического потепления, увеличению площади мерзлоты. В центральной части БЗТ в зоне прерывистого распространения ММП выделяется участок возможного образования новых термокарстовых озер, хотя в целом в пределах зоны сохранится стабильная ситуация.

Прогнозируемое в результате моделирования развитие термокарстовых процессов в пределах небольших участков в зонах массивно-островного и островного распространения ММП маловероятно, в связи с преобладанием в настоящее время в их пределах территорий без мерзлоты и, следовательно, с отсутствием природных (мерзлотных) предпосылок для термокарстовых проявлений.

Сопоставление полученных результатов моделирования с районами хозяйственного освоения БЗТ показало, что в зоне возможной активизации термокарстовых проявлений (появления новых термокарстовых озер или дренирования озер и формирования хасыреев) в пределах зон сплошного и прерывистого распространения ММП находятся крупнейшие на сегодняшний день нефтяные и газоконденсатные месторождения Европейской территории России.

Достоверность полученных результатов моделирования может быть увеличена, если детали-

зировать входные данные в соответствии с традиционной для российского мерзловедения классификацией геокриологической зональности, в большей степени учитывающей специфику региональных геокриологических условий в пределах БЗТ (например, исключить из используемого в качестве входного слоя территории с незначительным по площади развитием ММП или их отсутствием согласно российской классификации). Достоверность результатов моделирования может быть существенно увеличена за счет улучшения пространственного разрешения входных данных, а также расширения числа используемых в модели биоклиматических переменных и большего числа используемых параметров неклиматического ряда, таких как фоновая температура многолетнемерзлых пород, глубина сезонного протаивания, льдистость грунтов, их теплофизические свойства, особенности растительного покрова и др. Интересным представляется расширение количества используемых алгоритмов моделирования из числа 10 встроенных в Biomod2. В дальнейшем также возможно применение методов глубокого обучения на основе материалов дистанционного зондирования Земли.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Исследование выполнено в рамках темы НИР по Государственному заданию географического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова №121051100162-6 и Программы развития Междисциплинарной научно-образовательной школы МГУ имени М.В. Ломоносова “Будущее планеты и глобальные изменения окружающей среды”.

FUNDING

The study was carried out within the framework of the State Assignment of the Faculty of Geography of Lomonosov Moscow State University no. 121051100162-6.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Викторов А.С., Капралова В.Н., Архипова М.В. Моделирование развития морфологической структуры эрозионно-термокарстовых равнин с использованием материалов дистанционных съемок // Исследование земли из космоса. 2019. № 2. С. 55–64.
- Гречищев С.Е., Чистотинов Л.В., Шур Ю.Л. Криогенные физико-геологические процессы и их прогноз. М.: Недра, 1980. 383 с.
- Достовалов В.Н., Кудрявцев В.А. Общее мерзловедение: Учеб. М.: Изд-во Моск. ун-та, 1967. 403 с.
- Зенгина Т.Ю., Осадчая Г.Г., Парада Н.Н. Биосферные функции криолитозоны Тимано-Печорской нефтегазоносной провинции в условиях промышлен-

- ленного освоения // Вестн. Рос. ун-та дружбы народов. Сер. Экология и безопасность жизнедеятельности. Изд-во Российского университета дружбы народов. 2011. № 3. С. 32–38.
- Капралова В.Н., Викторов А.С. Количественные закономерности изменения размеров термокарстовых озер и оценка рисков // Сергеевские чтения. М.: ГЕОС, 2013. Вып. 15. С. 437–442.
- Качурин С.П. Термокарст на территории СССР. М., 1961. 291 с.
- Кирикова Н.С., Осадчая Г.Г. К вопросу о вероятности развития термокарста в Тимано-Печорской провинции // Инженерно-геологическое изучение термокарстовых процессов и методы управления ими при строительстве и эксплуатации сооружений (ИГК-98). СПб.: ВНИИГ им. Б.Е. Веденеева, 1998. С. 32–35.
- Кравцова В.И. Распространение термокарстовых озер в России в пределах зоны современной мерзлоты // Вестн. Моск. ун-та. Сер. 5. География. 2009. № 3. С. 33–42.
- Малкова Г.В., Садуртдинов М.Р., Скворцов А.Г. и др. Температурный режим верхних горизонтов пород в нарушенных и ненарушенных криогенных ландшафтах европейского севера: матер. V конф. геокриологов России. Ч. 6: Динамическая геокриология. Москва, 14–17 июня 2016 г. Сумы: Университетская книга, 2016. С. 63–69.
- Маслов А.Д., Осадчая Г.Г., Тумель Н.В., Шполянская Н.А. Основы геокриологии: Учеб. пособие. Ухта: Институт управления, информации и бизнеса, 2005. 176 с.
- Общее мерзловедение / под ред. П.И. Мельникова, Н.И. Толстихина. Новосибирск: Наука, Сибирское отд., 1974. 302 с.
- Осадчая Г.Г. Торфяники криолитозоны европейского северо-востока: зональные особенности развития // Современные исследования трансформации криосферы и вопросы геотехнической безопасности сооружений в Арктике / под ред. В.П. Мельникова и М.Р. Садуртдинова. Салехард, 2021. С. 327–330.
- Осадчая Г.Г., Зенгина Т.Ю. Возможности сбалансированного использования биосферного и ресурсного потенциала Большеземельской тундры // Криосфера Земли. 2012. Т. XVI. № 2. С. 43–51.
- Осадчая Г.Г., Пижанкова Е.И. Мерзлотно-ландшафтные условия Большеземельской тундры и их картографирование на основе использования дистанционных данных // Криосфера Земли. 2023. Т. XXVII. № 6. С. 12–26.
- Осадчая Г.Г., Тумель Н.В., Королева А.М. Морфологическая структура криогенных ландшафтов Большеземельской тундры // Криосфера Земли. 2016. Т. XX. № 3. С. 14–23.
- Осадчая Г.Г., Тумель Н.В., Зенгина Т.Ю., Лаптева Е.М. Обзорная геокриологическая карта Большеземельской тундры (Республика Коми и Ненецкий автономный округ) М-б 1 : 1000000 // В рамках проекта ПРООН/ГЭФ/ЕС “Укрепление системы особо охраняемых природных территорий Республики Коми в целях сохранения биоразнообразия первичных лесов в районе верховьев р. Печора”, 2015. С. 1–112.
- Полищук В.Ю., Полищук Ю.М. Геоимитационное моделирование полей термокарстовых озер в зонах мерзлоты. Ханты-Мансийск: УИП ЮГУ, 2013. 129 с.
- Природные опасности России. Геокриологические опасности. М.: Изд-во фирма “Крук”, 2000. 315 с.
- Тумель Н.В., Зотова Л.И. Геоэкология криолитозоны: Учеб. пособие. М.: Географический фак-тет МГУ, 2014. 244 с.
- Фельдман Г.М. Термокарст и вечная мерзлота. Новосибирск: Наука, 1984. 261 с.
- Хабибуллин И.Л., Лобастова С.А., Хусаинова З.Р., Солдаткин М.В., Бураншина А.Р. Моделирование процесса термокарста // Вестн. Башкирского ун-та. 2007. № 1. С. 21–24.
- Шполянская Н.А., Осадчая Г.Г., Малкова Г.В. Современные изменения климата и реакция криолитозоны (на примере Западной Сибири и Европейского севера России) // Географическая среда и живые системы. 2022. № 1. С. 6–29.
<https://doi.org/10.18384/2712-7621-2022-1-6-30>
- Шур Ю.Л. Верхний горизонт толщи мерзлых пород и термокарст. Новосибирск: Наука. Сиб. отд., 1988. 213 с.
- Brown J., Ferrians O.J., Hegginkbottom J.A., Melnikov E.S. Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions. Map CP-45. In Circum-Pacific Map Series. Washington: U.S. Geological Survey, 1997.
<https://doi.org/110.3133/cp45>
- Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas // Int. J. Climatol. 2017. Vol. 37. P. 4302–4315.
<https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Guisan A., Thuiller W., Zimmermann N. The Biomod2 Modeling Package Examples. In Habitat Suitability and Distribution Models: With Applications in R // Ecology, Biodiversity and Conservation. P. 357–400. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2017.
<https://doi.org/10.1017/9781139028271.027>
- Huang L., Liu L., Jiang L., Zhang T. Automatic Mapping of Thermokarst Landforms from Remote Sensing Images Using Deep Learning: A Case Study in the Northeastern Tibetan Plateau // Remote Sens. 2018. Vol. 10. 2067 p.
<https://doi.org/10.3390/rs1012206>
- Kuncheva L., Whitaker C. Measures of diversity in classifier ensembles // Machine Learning. 2003. Vol. 51. P. 181–207.
<https://doi.org/10.1023/A:1022859003006>
- Malkova G., Drozdov D., Vasiliev A., et al. Spatial and Temporal Variability of Permafrost in the Western Part of the Russian Arctic // Energies. 2022. Vol. 15. 2311 p.
<https://doi.org/10.3390/en15072311>
- Nitze I., Cooley S.W., Duguay C.R., Jones B.M., Grosse G. The catastrophic thermokarst lake drainage events of 2018 in northwestern Alaska: fast-forward into the future // The Cryosphere. 2020. Vol. 14. P. 4279–4297.
<https://doi.org/10.5194/tc-14-4279-2020>

- Olefelt D., Goswami S., Grosse G., Hayes D.J., Hugelius G., Kuhry P., Sannel B., Schuur E.A.G., Turetsky M.R. Arctic Circumpolar Distribution and Soil Carbon of Thermokarst Landscapes. 2015.
https://doi.org/10.3334/ORNLDAAAC/1332
- Opitz D., Maclin R. Popular ensemble methods: An empirical study // J. of Artificial Intelligence Res. 1999. Vol. 11. P. 169–198.
https://doi.org/10.1613/jair.614
- Popova A.A., Rivkin F.M., Ivanova N.V. Map of Engineering-Geocryological Zoning of European North-East, Scale 1 : 1000000 / 2nd European Conference on Permafrost. Potsdam, 2005. P. 190–191.
- Shpolianskaya N. Permafrost dynamics and Global Climate Change // Biodiversity and Ecosystem Insecurity. A Planet in Peril. London–Washington, DC: Earthscan, 2011. P. 130–140.
- Thuiller W., Lafourcade B., Engler R., Araujo M.B. BIOMOD—a platform for ensemble forecasting of species distributions // Ecography. 2009. Vol. 32. P. 369–373.
https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2008.05742.x
- Thuiller W., Georges D., Engler R. biomod2: Ensemble platform for species distribution modelling, 2014.
- Wood S.N. Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models // J. R. Stat. Soc. B. 2011. Vol. 73. P. 3–36.
https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2010.00749.x
- Yin G., Luo J., Niu F., et al. Machine learning-based thermokarst landslide susceptibility modeling across the permafrost region on the Qinghai-Tibet Plateau // Landslides. 2021. Vol. 18. P. 2639–2649.
https://doi.org/10.1007/s10346-021-01669-7
- Zengina T., Baranov V., Kirillov S., Slipenchuk M. Using Ensemble Machine Learning Methods for Regional Forecasting of Geocryological Manifestations (on the Example of the European North-East of Russia). In: Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems. Second International Conference, ITIDMS2022, Virtual Event, December 12–14, 2022, Revised Selected Papers / A. Gibadullin (Ed.). Cham: Springer, 2023.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-31353-0_10
- Ziehn T., Chamberlain M., Lenton A., Law R., Bodman R., Dix M., Mackallah Ch., Druken K., Ridzwan S.M. CSIRO ACCESS-ESM1.5 model output prepared for CMIP6 C4MIP // Earth System Grid Federation. 2019.
https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.2286

Geoinformation Modeling of Lake Thermokarst Landscapes of the Bolshezemelskaya Tundra to Predict Their Development under Climate Changes

T. Yu. Zengina^{a, *}, G. G. Osadchaya^{b, **}, and V. V. Baranov^{a, ***}

^aLomonosov Moscow State University, Moscow, Russia

^bUkhta State Technical University, Ukhta, Russia

*e-mail: tzengina@mail.ru

**e-mail: galgriosa@yandex.ru

***e-mail: bv2000rus@mail.ru

Using the Bolshezemelskaya tundra as an example, the experience of predictive modeling of thermokarst manifestations until 2040 is considered. The Biomod2 platform and ensemble modeling methods were used. Six WorldClim bioclimatic variables, the SRTM DEM, and a dataset on the distribution of thermokarst landscapes in the circumpolar permafrost zone from the project “Arctic Circumpolar Distribution and Soil Carbon of Thermokarst Landscapes” were used as input. The selection of the most important bioclimatic modeling parameters for the development of thermokarst is justified, and an algorithm for the pre-processing of initial raster and vector data is proposed. On the basis of four of the algorithms included in the Biomod2 platform, an ensemble modeling was carried out and the SRC algorithm was used. The results are visualized in two maps. The first map evaluates the probability of lake formation until 2040. The second map reflects the possible direction of the process with the assignment of 4 types of areas (1, there are no thermokarst lakes and will not be in 2040; 2, the state of lacustrine thermokarst landscapes will not change; 3, the formation of lakes will intensify; 4, lakes will drain and dry up). Analysis of the maps showed that a part of the zone of probable activation of thermokarst processes in 2040 will shift to the north and will remain highest for azonal coastal landscapes and along the lower course of the Pechora River. The direction of development of thermokarst lake landscapes in the north of the zone of modern continuous permafrost will not change significantly, however, in the south of this zone there are areas where thermokarst lakes will drain and turn into khasyreyes, which will lead to freezing of the near-surface thawed layer, formation of layered permafrost, and despite the trend of climate warming will lead to an increase in the area of permafrost. The predicted appearance of an area of activation of thermokarst manifestations in the subzone of sporadic permafrost north of the city of Inta is not consistent with the modern geocryological situation, which is obviously due to the underestimation of the geocryological features of the region by the authors of the project “Arctic Circumpolar Distribution and Soil Carbon of Thermokarst Landscapes.”

Keywords: Bolshezemelskaya tundra, thermokarst landscapes, climate changes, predictive modeling, ensemble methods of machine learning, oil and gas condensate fields

REFERENCES

- Brown J., Brown J., Ferrians O.J., Heggibottom J.A., Melnikov E.S. Circum-Arctic map of permafrost and ground-ice conditions. Map CP-45. In *Circum-Pacific Map Series*. Washington: U.S. Geological Survey, 1997. <https://doi.org/10.3133/cp45>
- Dostovalov V.N., Kudryavtsev V.A. *Obshchee merzlotovedenie: Uchebnik* [General Permafrost Science: Textbook]. Moscow: Izd-vo Mosk. Univ., 1967. 403 p.
- Fel'dman G.M. *Termokarst i vechnaya merzlota* [Thermokarst and Permafrost]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1984. 261 p.
- Fick S.E., Hijmans R.J. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.*, 2017, vol. 37, pp. 4302–4315. <https://doi.org/10.1002/joc.5086>
- Grechishchev S.E., Chistotinov L.V., Shur Yu.L. *Kriogennye fiziko-geologicheskie protsessy i ikh prognoz* [Cryogenic Physical-Geological Processes and Their Forecast]. Moscow: Nedra Publ., 1980. 383 p.
- Guisan A., Thuiller W., Zimmermann N. The Biomod2 Modeling Package Examples. In *Habitat Suitability and Distribution Models: With Applications in R*. CUP, 2017, pp. 357–400. <https://doi.org/10.1017/9781139028271.027>
- Huang L., Liu L., Jiang L., Zhang T. Automatic Mapping of Thermokarst Landforms from Remote Sensing Images Using Deep Learning: A Case Study in the Northeastern Tibetan Plateau. *Remote Sens.*, 2018, vol. 10, no. 12, art. 2067. <https://doi.org/10.3390/rs10122067>
- Kachurin S.P. *Termokarst na territorii SSSR* [Thermokarst in the USSR]. Moscow, 1961. 291 p.
- Kapralova V.N., Viktorov A.S. Quantitative regularities of changes in the size of thermokarst lakes and risk assessment. In *Sergeevskie chteniya. Vyp. 15*. [Sergeyev Readings. Vol. 15]. Moscow: GEOS Publ., 2013, pp. 437–442. (In Russ.).
- Khabibullin I.L., Lobastova S.A., Khusainova Z.R., Soldatkin M.V., Buranshina A.R. Simulation of the thermokarst process. *Vestn. Bashkir. Univ.*, 2007, no. 1, pp. 21–24. (In Russ.).
- Kirikova N.S., Osadchaya G.G. On the question of the probability of thermokarst development in the Timan-Pechora province. In *Inzhenerno-geologicheskoe izucheniye termokarstovykh protsessov i metody upravleniya imi pri stroitel'stve i ekspluatatsii sooruzhenii (IGK-98)* [Engineering-Geological Study of Thermokarst Processes and Methods of Their Management During the Construction and Operation of Structures (IGK-98)]. St. Petersburg: VNIIG im. B.E. Vedeneva, 1998, pp. 32–35. (In Russ.).
- Kravtsova V.I. Distribution of thermokarst lakes in Russia within the modern permafrost zone. *Vestn. Mosk. Univ., Ser.5. Geogr.*, 2009, no. 3, pp. 33–42. (In Russ.).
- Kuncheva L., Whitaker C. Measures of diversity in classifier ensembles. *Mach. Learn.*, 2003, vol. 51, pp. 181–207. <https://doi.org/10.1023/A:1022859003006>
- Malkova G., Drozdov D., Vasiliev A., et al. Spatial and temporal variability of permafrost in the western part of the Russian Arctic. *Energies*, 2022, vol. 15, art. 2311. <https://doi.org/10.3390/en15072311>
- Malkova G.V., Sadurtdinov M.R., Skvortsov A.G., et al. Temperature regime of the upper horizons of rocks in disturbed and undisturbed cryogenic landscapes of the European North. In *Materialy V konf. geokriologov Rossii. Ch. 6: Dinamicheskaya geokriologiya. Moskva, 14–17 iyunya 2016 g.* [Proceedings of the 5th Conf. of Geocryologists of Russia. Part 6: Dynamic Geocryology. Moscow, June 14–17, 2016]. Sumy: Univ. Kniga Publ., 2016, pp. 63–69. (In Russ.).
- Maslov A.D., Osadchaya G.G., Tumel' N.V., Shpolyanskaya N.A. *Osnovy geokriologii: Uchebnoe posobie* [Fundamentals of Geocryology: Textbook.]. Ukhta: Inst. Upravl., Inform. Biznesa, 2005. 176 p.
- Nitze I., Cooley S.W., Duguay C.R., Jones B.M., Grosse G. The catastrophic thermokarst lake drainage events of 2018 in northwestern Alaska: fast-forward into the future. *Cryosphere*, 2020, vol. 14, pp. 4279–4297. <https://doi.org/10.5194/tc-14-4279-2020>
- Obshchee merzlotovedenie* [General Permafrost Science]. Melnikova P.I., Tolstikhina N.I., Eds. Novosibirsk: Nauka Publ., 1974. 302 p.
- Olefelt D., Goswami S., Grosse G., Hayes D.J., Hugelius G., Kuhry P., Sannel B., Schuur E.A.G., Turetsky M.R. *Arctic circumpolar distribution and soil carbon of thermokarst landscapes*, 2015. <https://doi.org/10.3334/ORNDAAC/1332>
- Opitz D., Maclin R. Popular ensemble methods: An empirical study. *J. Artif. Intell. Res.*, 1999, vol. 11, pp. 169–198. <https://doi.org/10.1613/jair.614>
- Osadchaya G.G., Tumel' N.V., Koroleva A.M. Morphological structure of cryogenic landscapes of the Bolshezemelskaya tundra. *Kriosf. Zemli*, 2016, vol. 20, no. 3, pp. 14–23. (In Russ.).
- Osadchaya G.G., Zengina T.Yu. Opportunities for balanced use of the biosphere and resource potential of the Bolshezemelskaya tundra. *Kriosf. Zemli*, 2012, vol. 16, no. 2, pp. 43–51. (In Russ.).
- Osadchaya G.G., Pizhankova E.I. Permafrost–landscape conditions of the Bolshezemelskaya tundra and their mapping based on remote sensing data. *Kriosf. Zemli*, 2023, vol. 27, no. 6, pp. 12–26. (In Russ.).
- Osadchaya G.G. Peatlands of the permafrost zone of the European northeast: zonal features of development. In *Sovremennyye issledovaniya transformatsii kriosfery i voprosy geotekhnicheskoi bezopasnosti sooruzhenii v Arktike* [Modern Research of the Transformation of the Cryosphere and Issues of Geotechnical Safety of Structures in the Arctic]. Melnikov V.P., Sadurtdinova M.R., Eds. Salekhard, 2021, pp. 327–330. (In Russ.).
- Osadchaya G.G., Tumel' N.V., Zengina T.Yu., Lapteva E.M. *Obzornaya geokriologicheskaya karta Bol'shezemel'skoi tundry (Respublika Komi i Nenetskii avtonomnyi okrug), M. 1 : 1000000* [Overview Geocryological Map of the Bolshezemelskaya Tundra (Republic of Komi and Nenets Autonomous Okrug), Scale 1 : 1 000 000], 2015. 112 p.

- Polishchuk V.Yu., Polishchuk Yu.M. *Geoimitatsionnoe modelirovanie polei termokarstovykh ozer v zonakh merzloty* [Geosimulation Modeling of Fields of Thermokarst Lakes in Permafrost Zones]. Khanty–Mansiisk: UIP YUGU, 2013. 129 p.
- Popova A.A., Rivkin F.M., Ivanova N.V. Map of Engineering–Geocryological Zoning of European North–East, Scale 1 : 1000000. In *2nd European Conference on Permafrost*. Potsdam, 2005, pp. 190–191.
- Prirodnye opasnosti Rossii. Geokriologicheskie opasnosti* [Natural Hazards of Russia. Geocryological Hazards]. Moscow: Kruk Publ., 2000. 315 p.
- Shpolianskaya N. Permafrost dynamics and Global Climate Change. In *Biodiversity and Ecosystem Insecurity. A Planet in Peril*. London, Washington: Earthscan, 2011, pp. 130–140.
- Shpolyanskaya N.A., Osadchaya G.G., Malkova G.V. Modern climate changes and permafrost response (on the example of Western Siberia and the European North of Russia). *Geograf. Sreda Zhivye Sist.*, 2022, no. 1, pp. 6–29. (In Russ.).
<https://doi.org/10.18384/2712-7621-2022-1-6-30>
- Shur Yu.L. *Verkhnyy gorizont tolshchi merzlykh porod i termokarst* [Upper Horizon of Permafrost and Thermokarst]. Novosibirsk: Nauka Publ., 1988. 213 p.
- Thuiller W., Lafourcade B., Engler R., Araujo M.B. BIOMOD—a platform for ensemble forecasting of species distributions. *Ecography*, 2009, vol. 32, pp. 369–373.
<https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2008.05742.x>
- Thuiller W., Georges D., Engler R. *biomod2: Ensemble platform for species distribution modelling*, 2014.
- Tumel' N.V., Zotova L.I. *Geoekologiya kriolitozony: Uchebnoe posobie* [Geocology of Permafrost: Textbook]. Moscow: Geogr. Fakul. MGU, 2014. 244 p.
- Viktorov A.S., Kapralova V.N., Arkhipova M.V. Modeling the development of the morphological structure of erosion–thermokarst plains using remote sensing data. *Issled. Zemli Kosmosa*, 2019, no. 2, pp. 55–64. (In Russ.).
- Wood S.N. Fast stable restricted maximum likelihood and marginal likelihood estimation of semiparametric generalized linear models. *J. R. Stat. Soc. B.*, 2011, vol. 73, pp. 3–36.
<https://doi.org/10.1111/j.1467-9868.2010.00749.x>
- Yin G., Luo J., Niu F., et al. Machine learning–based thermokarst landslide susceptibility modeling across the permafrost region on the Qinghai–Tibet Plateau. *Landslides*, 2021, vol. 18, pp. 2639–2649.
<https://doi.org/10.1007/s10346-021-01669-7>
- Zengina T.Yu., Osadchaya G.G., Parada N.N. Biospheric functions of the permafrost zone of the Timan–Pechora oil and gas province under conditions of industrial development. *Vestn. RUDN, Ser. Ekol. Bezopasn. Zhiznedeyat.*, 2011, no. 3, pp. 32–38. (In Russ.).
- Zengina T., Baranov V., Kirillov S., Slipenchuk M. Using ensemble machine learning methods for regional forecasting of geocryological manifestations (on the example of the European North–East of Russia). In *Information Technologies and Intelligent Decision Making Systems. Second International Conference, ITIDMS2022, Virtual Event, December 12–14, 2022, Revised Selected Papers*. Gibadullin A., Ed. Cham: Springer, 2023.
https://doi.org/10.1007/978-3-031-31353-0_10
- Ziehn T., Chamberlain M., Lenton A., Law R., Bodman R., Dix M., Mackallah Ch., Druken K., Ridzwan S.M. CSIRO ACCESS–ESM1.5 model output prepared for CMIP6 C4MIP. Version YYYYMMDD. Earth System Grid Federation, 2019.
<https://doi.org/10.22033/ESGF/CMIP6.2286>