

Анализ точности и чувствительности глобальной модели многолетнемёрзлых пород GlobPermafrost на территорию Скандинавии

Н. Б. Нестерова¹, Я. Обу²

¹ Тюменский государственный университет, Тюмень, 625003, Россия
E-mail: n.b.nesterova@utmn.ru

² Университет Осло, Осло, 0315, Норвегия
E-mail: jaroslav.obu@geo.uio.no

В статье представлены результаты анализа точности циркумполярной геокриологической карты GlobPermafrost, созданной по результатам одноимённой модели. Анализ точности проводился сопоставлением геокриологической карты GlobPermafrost на территорию Скандинавии с региональной Скандинавской геокриологической картой. Для сравнения использовались значения вероятности распространения многолетнемёрзлых пород (ММП), отображённые на обеих геокриологических картах и рассчитанные моделью GlobPermafrost на территорию северного полушария и региональную моделью — на территорию Скандинавии (Норвегии, Швеции и Финляндии). Сравнение показало, что в целом модель GlobPermafrost занижает значения вероятности распространения ММП по сравнению со значениями, рассчитанными региональной моделью. Самое сильное занижение характерно для горных и заболоченных областей, где наблюдается наибольшее в Скандинавии распространение ММП. Наиболее точно GlobPermafrost моделирует вероятность распространения ММП на территории, где почти нет многолетнемёрзлых пород. Помимо анализа точности модели GlobPermafrost была выполнена оценка её чувствительности к более детальным данным земельного покрова Corine Land Cover 2012 как к элементам входных данных. Для этого был проведён эксперимент, включавший в себя перезапуск модели с этими данными. Более точные данные земельного покрова неожиданно незначительно повлияли на итоговую погрешность модели GlobPermafrost на территорию Скандинавии. Результаты свидетельствуют о чувствительности модели на изучаемой территории к другим входным данным. Также отмечается необходимость дальнейшего исследования значимости остальных входных данных как на территорию Скандинавии, так и на другие регионы северного полушария.

Ключевые слова: многолетнемёрзлые породы, моделирование, GlobPermafrost, Арктика, геокриологические карты

Одобрена к печати: 25.12.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-101-110

Введение

Суровые природные условия и отдалённость территорий исследований накладывают определённые ограничения на мониторинг и картирование многолетнемёрзлых пород (ММП) в полевых условиях. Значения температуры поверхности Земли, получаемые со спутников, могут быть использованы в численном моделировании характеристик и распространения ММП. Модели, рассчитывающие характеристики и распространение ММП (модели ММП), помогают решить проблемы природных ограничений полевых исследований.

В данной статье рассматриваются две модели ММП: региональная, разработанная на территорию Швеции, Норвегии и Финляндии (далее — региональная) (Gisnas et al., 2017) и глобальная GlobPermafrost (далее — глобальная), подготовленная в рамках проекта Европейского космического агентства (European Space Agency — ESA) для северного полушария (Obu et al., 2019). Результатами обеих моделей являются карты вероятности обнаружения мерзлоты на территории исследования (далее — геокриологические карты). Настоящая работа преследовала две цели. Первая состояла в оценке точности геокриологической карты, построенной глобальной моделью GlobPermafrost на территорию Норвегии, Швеции

и Финляндии, сравнением с региональной геокриологической картой. Вторая цель заключалась в определении значимости земельного покрова как одного из элементов входных данных в модели GlobPermafrost.

Моделирование температуры кровли ММП

Обе модели, используемые в данной работе, — глобальная GlobPermafrost и региональная — относятся к одной семье равновесных моделей ТТОР (temperature at the top of permafrost) (Smith, Riseborough, 1996). Основным результатом всех моделей этой семьи является расчёт среднегодовой температуры кровли многолетнемерзлых пород (максимальной глубины сезонно талого слоя). Вычисление среднегодовой температуры кровли ММП авторы обеих моделей (см. работы (Gisnas et al., 2017; Obu et al., 2019)) осуществляли по формуле (Smith, Riseborough, 1996):

$$T_{TOP} = \frac{k_T N_T DDT_A - k_F N_F DDF_A}{k_F P},$$

где k_T — теплопроводность талого грунта ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$); k_F — теплопроводность мёрзлого грунта ($\text{Вт}\cdot\text{м}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$); N_T — N -фактор для талых пород; N_F — N -фактор для мёрзлых пород; P — временной период (365 дней);

Градусо-день — это условная единица измерения превышения средней суточной температуры воздуха над неким заданным минимум температуры. DDT_A (air thawing degree days) и DDF_A (air freezing degree days) — количество градусо-дней с установленным минимум температуры, достаточным соответственно для таяния и промерзания пород (рассчитывались авторами по температуре воздуха).

В теоретической работе (Smith, Riseborough, 1996) о ТТОР-моделировании N -факторы представляют собой численные коэффициенты и должны учитывать локальное воздействие растительного и снежного покровов на температуру поверхности Земли.

В региональной модели (Gisnas et al., 2017) N -факторы определялись по-разному для территорий с растительным покровом и без него. Для территорий с растительным покровом N -факторы устанавливались авторами на основе данных земельного покрова на территорию Европы Corine Land Cover 2012 (Aune-Lundberg, Strand, 2010). Для территорий без растительного покрова определялось влияние снежного покрова с помощью расчётов плотности вероятности* распределения его высоты (Skaugen et al., 2004). Для этого использовались климатические данные продукта Nordic Gridded Climate Dataset (NGCD; <http://blog.fmi.fi/nordmet/node/100>). В итоге N -фактор для территорий без растительного покрова представлял собой численный коэффициент для каждого значения высоты снежного покрова.

Значения коэффициентов теплопроводности устанавливались авторами региональной модели для каждого типа отложений по карте отложений Норвегии, Швеции и Финляндии (Olesen et al., 2010), а градусо-дни рассчитывались по данным NGCD.

Региональная модель была запущена 100 раз с разными значениями N -факторов для территорий без растительного покрова. Результатом стало распределение, состоящее из 100 разных среднегодовых температур кровли ММП для каждой ячейки сетки 1×1 км. Для каждой ячейки была подсчитана доля (значения от 0 до 1,0) среднегодовой температуры кровли ММП ниже 0°C . Эта доля, согласно авторам работы (Gisnas et al., 2017), представляет собой вероятность обнаружения ММП на территории исследования, т.е. несёт информацию о распространении ММП. Итоговым результатом является графическое изображение вероятности распространения ММП для каждой ячейки — (геокриологическая) карта с данными значениями на территорию Скандинавии.

Для глобальной модели градусо-дни рассчитывались по данным реанализа ERA-Interim (Dee et al., 2011) вместе с температурой поверхности Земли со спутников Terra MODIS и Aqua MODIS (Obu et al., 2019). Значения теплопроводности в глобальной модели устанавливались

* Один из способов задания распределения случайной величины.

по данным влажности тундры (Widhalm et al., 2016) и классам глобальных данных земельного покрова ESA CCI (Climate Change Initiative) (Obu et al., 2019).

Схожим образом в глобальной модели для определения N -факторов авторы работы (Obu et al., 2019) использовали глобальные данные земельного покрова Программы по изменению климата Европейского космического агентства (European Space Agency Climate Change Initiative — ESA CCI) и метеорологические данные реанализа ERA-Interim (Dee et al., 2011) вместе с температурами поверхности Земли. Последние были получены с космических снимков спутников Terra MODIS и Aqua MODIS за период с 01.01.2000 по 31.12.2016 на площади 1200×1200 км. Было использовано 104 ячейки (926×926 м) сетки космических снимков MODIS. Пробелы в данных из-за облаков авторы модели восполнили данными о температуре воздуха ERA-Interim, масштаб которых был уменьшен до размера пикселей на снимках MODIS. Влияние снежного покрова также учитывалось с помощью схожих расчётов распределения высоты снежного покрова.

В одной ячейке сетки глобальной модели могли располагаться территории, относящиеся к разным классам данных земельного покрова ESA CCI. Ввиду этого для глобальной модели также проводился анализ статистики представленности разных классов земельного покрова в каждой ячейке. В итоге глобальная модель была запущена 200 раз с различными комбинациями N -факторов и коэффициентов теплопроводности в соответствии со статистикой классов земельного покрова по каждой ячейке. Результатом также стало распределение среднегодовых температур кровли ММП для каждой ячейки.

Как и в региональной модели, для каждой ячейки были подсчитаны доли среднегодовой температуры кровли ММП ниже 0°C — значения вероятности распространения ММП — и построена по этим значениям глобальная геокриологическая карта.

Материалы и методы

В связи с тем, что геокриологическая карта Норвегии, Швеции и Финляндии (Скандинавии), рассчитанная с помощью региональной модели ТТОР, является в настоящий момент самой новой и детальной на данную территорию, мы допускаем, что она представляет точную информацию о распространении ММП в Скандинавии. В связи с этим именно данная карта была выбрана для проверки и оценки точности расчётов глобальной модели GlobPermafrost на территорию Скандинавии. Точность определялась сравнением значений вероятности распространения ММП глобальной геокриологической карты GlobPermafrost (результата модели) со значениями вероятности распространения ММП на региональной Скандинавской геокриологической карте. Для сопоставления были использованы методы простого растрового анализа: наложение и извлечение. Для этого на обеих картах были установлены одинаковые географические границы, пространственное разрешение 926 м и проекция WGS 1984 Arctic Polar Stereographic. Пространственные данные значений вероятности распространения ММП на карте GlobPermafrost были извлечены для области исследования и подлежали дальнейшему сравнению со значениями вероятности распространения ММП на Скандинавской геокриологической карте путём их наложения, а затем вычитания.

Чувствительность модели к определённому элементу входных данных можно определить заменой этого элемента, перезапуском модели и оценкой изменений результатов. Для оценки значимости земельного покрова как элемента входных данных, иными словами, чувствительности модели именно к этому элементу входных данных, глобальная модель GlobPermafrost была перезапущена с данными земельного покрова Corine Land Cover 2012 (с пространственным разрешением в три раза выше) вместо изначально используемых данных земельного покрова ESA CCI. Под перезапуском модели авторы имеют в виду повторное осуществление математических расчётов, подразумевающихся в модели, с учётом новых значений изменённых входных данных. В связи с заменой данных земельного покрова значения N -факторов и теплопроводности, используемые для групп классов ESA CCI, были присвоены схожим группам классов земельного покрова Corine Land Cover 2012. Далее был осуществлён схожий растровый анализ.

Результаты и обсуждение

Оценка точности глобальной геокриологической карты GlobPermafrost на территорию Скандинавии

График отношения значений вероятности распространения ММП на региональной и глобальной геокриологических картах (рис. 1) показывает, что в целом значения на карте GlobPermafrost существенно ниже значений региональной карты. То есть модель GlobPermafrost занижает значения вероятности распространения ММП относительно значений, рассчитанных региональной моделью. При этом с увеличением значений вероятности распространения ММП эта разница увеличивается. Это значит, что модель GlobPermafrost верно оценивает полное отсутствие островной мерзлоты или её наличие там, где вероятность распространения ММП имеет низкие значения (примерно от 0 до 0,25), и наоборот, неверно определяет сплошное распространение ММП. Модель GlobPermafrost описывает примерно 40 % дисперсии значений, рассчитанных на данную территорию региональной моделью, так как коэффициент детерминации равен 0,388.

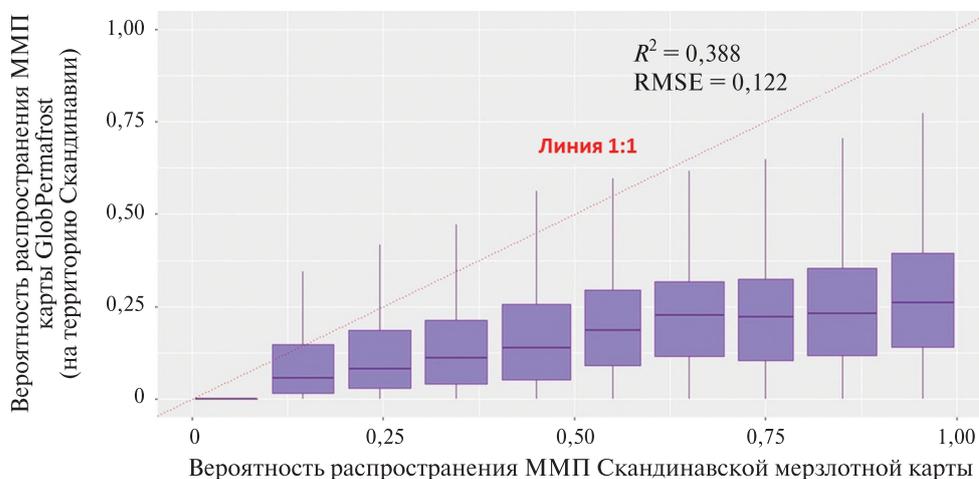
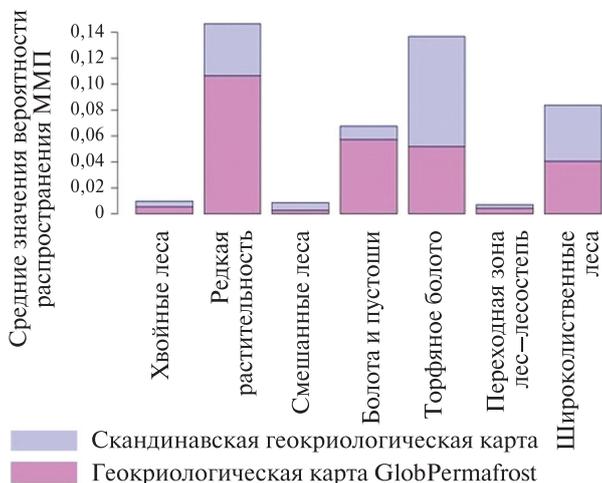


Рис. 1. Отношения значений вероятности распространения ММП на глобальной геокриологической карте (GlobPermafrost) и региональной. R^2 — коэффициент детерминации; RMSE — среднеквадратичное отклонение. Данные показаны в виде диаграммы размаха: в прямоугольниках отображено 75 % данных, горизонтальная линия посередине — медиана, вертикальные линии обозначают отклонение, крайние точки отображают максимальные и минимальные значения; выбросы исключены

В целом самые высокие средние значения вероятности распространения ММП на региональной геокриологической карте находятся в таких классах земельного покрова, как «области с редкой растительностью» и «торфяное болото» (рис. 2), в этих же классах можно обнаружить и максимальное занижение значений глобальной моделью GlobPermafrost.



На рис. 3 (см. с. 105) показана карта разностей значений вероятностей распространения ММП между региональной и глобальной геокриологическими картами. Разности значений менее 0,1 были исключены.

Рис. 2. Средние значения вероятности распространения ММП для разных классов земельного покрова Corine Land Cover 2012 на региональной геокриологической карте и глобальной (GlobPermafrost)

Рис. 2. Средние значения вероятности распространения ММП для разных классов земельного покрова Corine Land Cover 2012 на региональной геокриологической карте и глобальной (GlobPermafrost)

Области, где значения вероятности распространения ММП на региональной карте больше, чем на глобальной, расположены в горах, они отображены на карте жёлтым цветом. В то же время области, где модель GlobPermafrost предсказывает более высокие значения вероятности распространения ММП по сравнению с региональной моделью, сосредоточены на севере Скандинавии, где находятся торфяники и заболоченные территории.

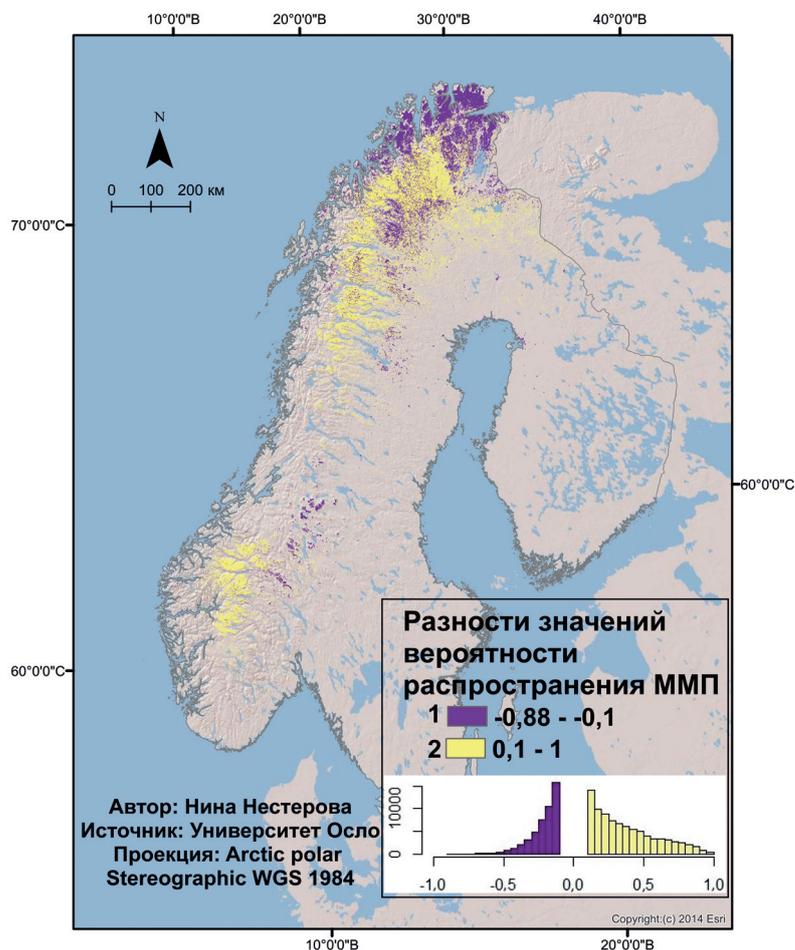


Рис. 3. Карта разности значений вероятности распространения ММП между региональной геокриологической картой и глобальной (GlobPermafrost): 1 — отрицательные разности, где значения на карте GlobPermafrost выше, чем на региональной; 2 — положительные разности, где значения на региональной карте выше, чем на карте GlobPermafrost. Гистограмма разности значений отображает их распределение

Оценка значимости земельного покрова в модели GlobPermafrost

После перезапуска модели значения вероятности распространения ММП изменились незначительно, соответственно, несущественно изменилась и точность геокриологической глобальной карты GlobPermafrost относительно региональной: разница в коэффициенте детерминации составила всего 2 %. На рис. 4а изображена карта разностей значений вероятностей распространения ММП до и после перезапуска, разности менее 0,1 также исключены. Гистограммы разности значений вероятности распространения ММП по форме очень схожи, что свидетельствует о примерно одинаковом количестве областей, где значения вероятности распространения ММП увеличились после перезапуска модели и где они уменьшились. Это объясняет отсутствие значительных изменений в геокриологической карте GlobPermafrost после перезапуска. Наибольшие изменения (как положительные, так и отрицательные) отмечаются на севере — в заболоченных и заторфованных областях, где развиты ММП.

Распределение разностей по классам земельного покрова (рис. 4б, в) показывает, что после перезапуска модели значения вероятности распространения ММП значительно увеличились в болотах и пустошах и существенно уменьшились в лесах.

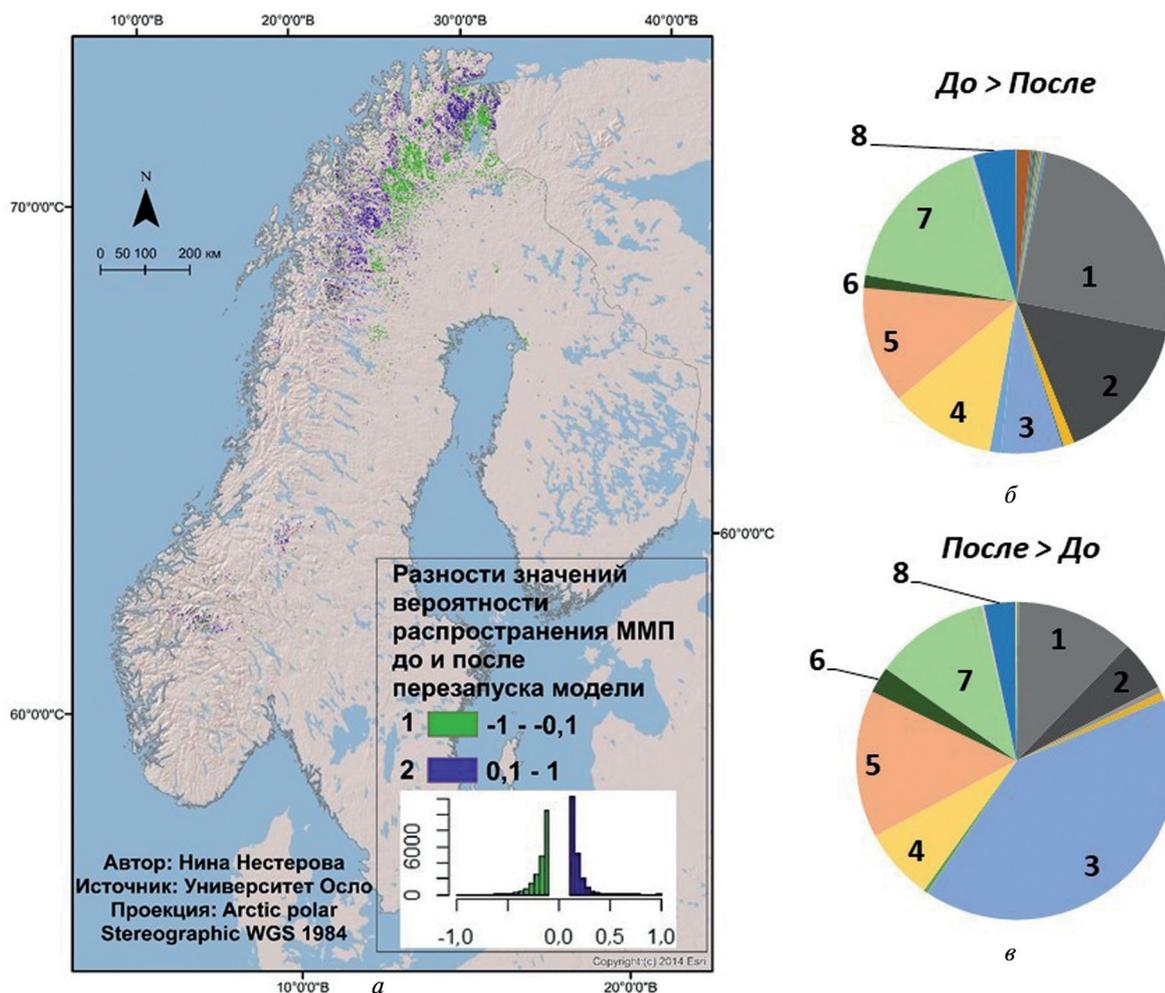


Рис. 4. Карта разностей значений мерзлотной вероятности ММП на карте GlobPermafrost до и после перезапуска модели (а): 1 — отрицательные разности, где после перезапуска значения вероятности распространения ММП выше, чем до него; 2 — положительные разности, где до перезапуска модели значения вероятности распространения ММП выше, чем после него; гистограмма разности значений отображает их распределение. Распределение положительных (б) и отрицательных (в) разностей по классам земельного покрова: 1 — широколиственные леса; 2 — хвойные леса; 3 — болота и пустоши; 4 — обнажения скальных пород; 5 — области с редкой растительностью; 6 — ледники, глетчерные льды, фирн; 7 — торфяные болота; 8 — водные объекты

Основная идея перезапуска GlobPermafrost именно с данными земельного покрова Corine Land Cover 2012 заключалась не только в ожидании значительных изменений вследствие более высокого разрешения данных, но и в положении, что классы земельного покрова, которые попадают под определение водно-болотных угодий, представлены в Corine Land Cover 2012 гораздо достовернее. Водно-болотные угодья играют большую роль для моделирования ММП в Арктике в целом и в Скандинавии в частности, так как мерзлота в данном регионе развита в заболоченных и заторфованных областях. Для определения значимости водно-болотных угодий при перезапуске модели был рассчитан условный показатель доли этих участков для карт земельного покрова Corine Land Cover 2012 и ESA CCI. Под долей водно-болотных угодий мы имеем в виду долю пикселей классов этих земель от общего количества пикселей для каждой ячейки модели GlobPermafrost. Под понятием «водно-болотные угодья»

подразумеваются такие классы земельного покрова в данных Corine Land Cover 2012, как торфяные болота, заболоченные территории, марши*, и схожие категории в данных ESA CCI. Гистограммы разностей значений доли водно-болотных угодий между двумя картами земельного покрова (рис. 5) по форме очень похожи.

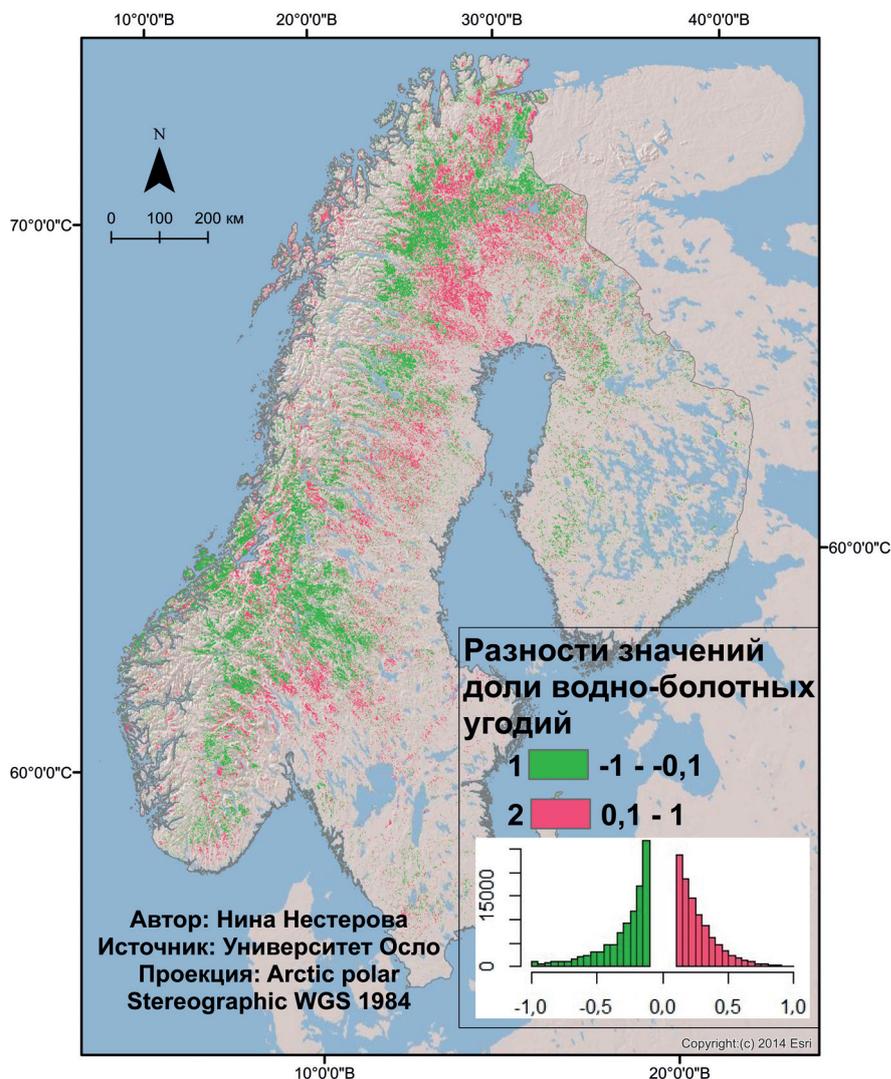


Рис. 5. Карта разности доли водно-болотных угодий на картах земельного покрова Corine Land Cover и ESA CCI: 1 — значения Corine Land Cover 2012 больше, чем ESA CCI; 2 — значения ESA CCI больше, чем Corine Land Cover 2012

Это говорит о том, что количество пикселей этих участков на карте Corine Land Cover 2012 на новых территориях, где на ESA CCI они не представлены, примерно равно количеству пикселей на ESA CCI, не представленных на карте Corine Land Cover 2012. Более того, области положительных разностей значений (см. рис. 5), где по данным Corine Land Cover 2012 водно-болотные угодья представлены на новых территориях, расположены на юге Скандинавии, который характеризуется почти полным отсутствием ММП. Это частично объясняет отсутствие значимого изменения значений вероятностей распространения ММП на карте GlobPermafrost после перезапуска модели.

При этом стоит отметить, что разность значений доли водно-болотных угодий между двумя картами земельного покрова (рис. 6) статистически значима на 1%-м уровне значимости:

* Затопляемая полоса низменных морских побережий (Шукин, 1980).

коэффициент детерминации построенной линейной модели равен 0,31, значение t -теста — 94,68 с $p < 0,001$. Таким образом, построенная линейная модель позволяет объяснить 31 % вариаций всех возникших изменений в значениях вероятностей распространения ММП до и после перезапуска модели.

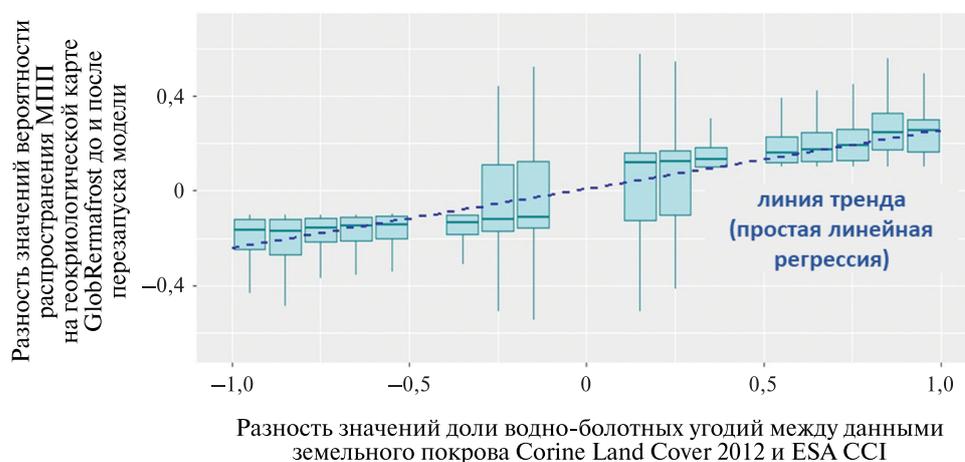


Рис. 6. Зависимость значений разности вероятности распространения ММП на карте GlobPermafrost до и после перезапуска модели и значений разности доли водно-болотных угодий между данными земельного покрова Corine Land Cover 2012 и ESA CCI. R^2 — коэффициент детерминации; RMSE — среднеквадратичное отклонение. Данные показаны в виде диаграммы размаха: в прямоугольниках отобрано 75 % данных, горизонтальная линия посередине — медиана, вертикальные линии обозначают отклонение, крайние точки отображают максимальные и минимальные значения; выбросы исключены

Заключение

В настоящей работе производился анализ геокриологической карты GlobPermafrost на территорию Скандинавии, а также оценка чувствительности модели к земельному покрову как к элементу входных данных.

Первоначальное сравнение показывает, что модель GlobPermafrost занижает значения вероятности распространения ММП по сравнению со значениями региональной геокриологической карты. Минимальное занижение значений обнаружено в областях с полным отсутствием или островным распространением ММП. И наоборот, наибольшее занижение было характерно для горных и заболоченных территорий, где высока вероятность обнаружения ММП.

Более детальные и точные входные данные земельного покрова (Corine Land Cover 2012) незначительно повлияли на изменение точности модели GlobPermafrost: разница в коэффициенте детерминации линейной регрессии относительно значений вероятностей распространения ММП Скандинавской геокриологической карты составила всего 2 %. Небольшие изменения после перезапуска модели были по большей части вызваны разностью доли водно-болотных угодий между двумя типами данных земельного покрова. Также значительное число пикселей с разностью доли водно-болотных угодий, которые могли бы повлиять на изменение геокриологической карты GlobPermafrost после перезапуска модели, имели слишком южное расположение. Упомянутые аспекты позволяют сделать вывод о несущественной чувствительности модели к данным земельного покрова Corine Land Cover 2012 как элементам входных данных в Скандинавии и, как следствие, о вероятной высокой значимости других входных данных в модель (например, климатической информации) для территории исследования. Анализ значимости остальных входных данных и тестирование точности модели GlobPermafrost на другие территории Арктики могут являться перспективными для дальнейших исследований в области верификации и анализа модели GlobPermafrost.

Авторы благодарят Себастиана Вестерманна и Маргарету Йоханссон за огромный вклад в осуществление данного исследования. Отдельная благодарность выражается Хомутову Артему Валерьевичу за поддержку.

Литература

1. Шукин И. С. Четырехязычный энциклопедический словарь терминов по физической географии: русско-англо-немецко-французский. М.: Советская энцикл., 1980. 703 с.
2. Aune-Lundberg L., Strand G. H. Corine Land Cover 2006. The Norwegian CLC2006 project: Norwegian Forest and Landscape Institute Report 8231101144. 2010. 14 p.
3. Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M. A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A. C. M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A. J., Haimberger L., Healy S. B., Hersbach H., Hólm E. V., Isaksen L., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A. P., Monge-Sanz B. M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F. The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system // Quarterly J. Royal Meteorological Society. 2011. P. 553–597.
4. Gissnas K., Etzelmüller B., Lussana C., Hjort J., Sannel A. B. K., Isaksen K., Westermann S., Kuhry P., Christiansen H. H., Frampton A., Åkerman J. Permafrost map for Norway, Sweden and Finland // Permafrost and Periglacial Processes. 2017. V. 28. P. 359–378. DOI: 10.1002/ppp.1922.
5. Johansson M., Christensen T. R., Åkerman H. J., Callaghan T. V. What determines the current presence or absence of permafrost in the Tornetrask region, a sub-arctic landscape in northern Sweden? // Ambio. 2006. V. 35. P. 190–197.
6. Obu J., Westermann S., Bartsch A., Berdnikov N., Christiansen H. H., Dashtseren A., Delaloye R., Elberling B., Etzelmüller B., Kholodov A., Khomutov A., Kääb A., Leibman M. O., Lewkowicz A. G., Panda S. K., Romanovsky V., Way R. G., Westergaard-Nielsen A., Wu T., Yamkhin J., Zou D. Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale // Earth-Science Reviews. 2019. V. 193. P. 299–316. URL: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023>.
7. Olesen O., Brønner M., Ebbing J., Gellein J., Gernigon L., Koziel J., Lauritsen T., Myklebust R., Pascal C., Sand M., Solheim D., Usov S. New aeromagnetic and gravity compilations from Norway and adjacent areas: methods and applications // Petroleum Geology Conference series. Geological Society of London. L., 2010. P. 559–586.
8. Skaugen T., Alfnes E., Langsholt E. G., Udnæs H. C. Time-variant snow distribution for use in hydrological models // Annals of Glaciology. 2004. V. 38. P. 180–186.
9. Smith M. W., Riseborough D. W. Permafrost monitoring and detection of climate change // Permafrost and Periglacial Processes. 1996. V. 7. P. 301–309.
10. Widhalm B., Bartsch A., Siewert M. B., Hugelius G., Elberling B., Leibman M. O., Dvornikov Y., Khomutov A. Site scale wetness classification of tundra regions with C-band SAR satellite data. Proc. ESA Living Planet Symp. 2016. 6 p.

Performance and sensitivity analysis of the global permafrost GlobPermafrost model for Scandinavia

N. B. Nesterova¹, J. Obu²

¹ University of Tyumen, Tyumen 625003, Russia
E-mail: n.b.nesterova@utmn.ru

² University of Oslo, Oslo 0315, Norway
E-mail: jaroslav.obu@geo.uio.no

The paper presents the results of accuracy analysis of the circumpolar permafrost map, which is an outcome of the GlobPermafrost model. For comparison, we have used permafrost probabilities from the GlobPermafrost map and the permafrost map developed for Norway, Sweden and Finland.

Administrative borders of these countries defined the study area. The comparison of permafrost probability values on both maps shows that the GlobPermafrost map underestimates values of the regional permafrost map. The maximum underestimation was found in mountains and wetlands, where the permafrost in Scandinavia occurs. The model shows the highest accuracy in areas where there is little or no permafrost at all. Apart from the GlobPermafrost performance analysis, we have also evaluated the sensitivity of the model to land cover data as a model input. To perform this we have conducted an experiment of rerunning the model with improved land cover data. Unexpectedly, the improved land cover data have not had any important effect on the GlobPermafrost performance. These results lead to the conclusion that the GlobPermafrost model is sensitive to other inputs thus there is a need to study their importance in Scandinavia as well as in other parts of the Arctic.

Keywords: permafrost, modeling, GlobPermafrost, Arctic, permafrost map

Accepted: 25.12.2019

DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-1-101-110

References

1. Shchukin I. S., *Chetyrekh'yazychnyi entsiklopedicheskii slovar' terminov po fizicheskoi geografii: russko-anglo-nemetsko-frantsuzskii* (Quadrilingual encyclopedic dictionary of terms in physical geography: Russian-English-German-French), Moscow: Sovetskaya entsiklopediya, 1980, 703 p.
2. Aune-Lundberg L., Strand G. H., *Corine Land Cover 2006, The Norwegian CLC2006 project: Norwegian Forest and Landscape Institute Report 8231101144*, 2010, 14 p.
3. Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M. A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A. C. M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A. J., Haimberger L., Healy S. B., Hersbach H., Hólm E. V., Isaksen I., Kållberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A. P., Monge-Sanz B. M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N., Vitart F., The ERA-Interim reanalysis: Configuration and performance of the data assimilation system, *Quarterly J. Royal Meteorological Society*, 2011, pp. 553–597.
4. Gisnas K., Eitzelmueller B., Lussana C., Hjort J., Sannel A. B. K., Isaksen K., Westermann S., Kuhry P., Christiansen H. H., Frampton A., Åkerman J., Permafrost map for Norway, Sweden and Finland, *Permafrost and Periglacial Processes*, 2017, Vol. 28, pp. 359–378, DOI: 10.1002/ppp.1922.
5. Johansson M., Christensen T. R., Åkerman H. J., Callaghan T. V., What determines the current presence or absence of permafrost in the Tornetrask region, a sub-arctic landscape in northern Sweden? *Ambio*, 2006, Vol. 35, pp. 190–197.
6. Obu J., Westermann S., Bartsch A., Berdnikov N., Christiansen H. H., Dashtseren A., Delaloye R., Elberling B., Eitzelmueller B., Kholodov A., Khomutov A., Kääb A., Leibman M. O., Lewkowicz A. G., Panda S. K., Romanovsky V., Way R. G., Westergaard-Nielsen A., Wu T., Yamkhin J., Zou D., Northern Hemisphere permafrost map based on TTOP modelling for 2000–2016 at 1 km² scale, *Earth-Science Reviews*, 2019, Vol. 193, pp. 299–316, available at: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.04.023>.
7. Olesen O., Brønner M., Ebbing J., Gellein J., Gernigon L., Koziel J., Lauritsen T., Myklebust R., Pascal C., Sand M., Solheim D., Usov S., New aeromagnetic and gravity compilations from Norway and adjacent areas: methods and applications, Petroleum Geology Conference series, *Geological Society of London*, London, 2010, pp. 559–586.
8. Skaugen T., Alfnes E., Langsholt E. G., Udnæs H. C., Time-variant snow distribution for use in hydrological models, *Annals of Glaciology*, 2004, Vol. 38, pp. 180–186.
9. Smith M. W., Riseborough D. W., Permafrost monitoring and detection of climate change, *Permafrost and Periglacial Processes*, 1996, Vol. 7, pp. 301–309.
10. Widhalm B., Bartsch A., Siewert M. B., Hugelius G., Elberling B., Leibman M. O., Dvornikov Y., Khomutov A., Site scale wetness classification of tundra regions with C-band SAR satellite data, *Proc. ESA Living Planet Symp.*, 2016, 6 p.