

Лавинная активность в России в условиях изменяющегося климата*

А.С. Турчанинова, С.А. Сократов, Ю.Г. Селиверстов, А.Ю. Комаров

Требования расчета определяемых климатическими условиями показателей лавинной активности на осваиваемых территориях и прогноз их изменения на будущее закреплены законодательством России. Однако требуемые для этого данные существуют далеко не для всех, только сейчас включаемых в промышленное освоение, регионов страны. Ранее на основе данных прямых наблюдений были определены зависимости между климатическими и геоморфологическими показателями и параметрами лавин и лавинной активности, основанные на среднемноголетней максимальной декадной высоте снежного покрова, числе дней со снежным покровом, продолжительности лавиноопасного периода и средней многолетней повторяемости лавин. Авторы включили в разработанную систему зависимостей климатические параметры, представляемые моделью MRI-CGCM3 (RCP 8.5). Это позволило рассчитать показатели лавинной активности на середину и конец XXI века, а также их изменение относительно современных условий. Таким образом была успешно апробирована методология, позволяющая включить нормативно определенные характеристики лавинной активности в анализ и прогнозы региональных изменений климата по любым климатическим сценариям.

Ключевые слова: снежные лавины, лавинная активность, изменение климата, CMIP5, MRI-CGCM3.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и РГО (проекты №№18-05-60080 и 15/2019/РГО-РФФИ).

Введение

Изменения во времени климатических факторов лавинообразования определяют изменения лавинной активности территории, а в совокупности с изменением степени хозяйственной освоенности могут также менять лавинную опасность и лавинный риск, в принятой на сегодня терминологии [1]. При текущем интенсивном освоении новых, прежде всего арктических, регионов России, помимо получения современных расчетных данных в составе результатов инженерных изысканий, включающих в себя, в случае лавиноопасного района, характеристики лавинной активности [2], законодательно требуется прогноз «изменения их значений в процессе строительства и эксплуатации» [3], то есть на многие десятилетия вперед. Очевидно, что суще-

ствующей на сегодня основой таких прогнозов могут рассматриваться лишь сценарные изменения климата. В межправительственных [4] и в отечественных [5] оценочных докладах об изменениях климата лавины включены в число опасных природных процессов, но в терминологии региональных изменений нормативно определенные характеристики лавинной активности не представлены.

Разработка используемых и в настоящее время моделей зависимостей между климатическими и геоморфологическими показателями и параметрами лавин и лавинной ак-



ТУРЧАНИНОВА
Алла Сергеевна
Московский
государственный университет
им. М.В. Ломоносова



СОКРАТОВ
Сергей Альфредович
Московский
государственный университет
им. М.В. Ломоносова



СЕЛИВЕРСТОВ
Юрий Германович
Московский
государственный университет
им. М.В. Ломоносова



КОМАРОВ
Антон Юрьевич
Московский
государственный университет
им. М.В. Ломоносова

тивности определялась необходимостью освоения горных территорий СССР и отсутствием возможности в полной мере охватить их наблюдениями. Одновременно разрабатывались методики составления карт, позволяющих с высокой долей достоверности относительно регистрируемых климатических условий описывать лавинный режим, в том числе на неисследованных ранее территориях [6–8].

Картографирование лавин

Материалы, собранные на хорошо изученных в лавинном отношении территориях, позволяют установить связи показателей лавинной активности с общими факторами лавинообразования, которые, в свою очередь, переносятся на неизученные территории. Таким образом были разработаны методы определения показателей лавинной активности по доступным или легко определяемым характеристикам климата (температура, осадки, продолжительность залегания снежного покрова) и рельефа (глубина расчленения) [9–11]. Другим имеющимся подходом является определение «лавиного климата» [12–14], для каждого типа которого на основании зарегистрированных лавин определяются средние значения приводящих к ним факторов лавинообразования (температура, осадки, высота и плотность снежного покрова). При всей схожести этих подходов только первый из них не требует значительного массива зарегистрированных лавин на конкретной анализируемой территории, поэтому он и использован в настоящем исследовании.

Среднемасштабные карты лавинной активности могут быть использованы для выявления общих закономерностей пространственно-временного распространения лавин. С практической точки зрения среднемасштабные карты необходимы для выявления районов, в пределах которых проектированию и освоению

территории должны предшествовать снеголавинные изыскания [15]. Такие карты не должны заменять крупномасштабные карты для конкретных объектов инфраструктуры, однако могут дать представление о прошлых, текущих или прогнозируемых изменениях.

Методика и материалы

Для расчета изменений климатических параметров и связанных с ними показателей лавинной активности из ансамбля CMIP 5 сценария RCP 8.5 МГЭИК была выбрана модель MRI-CGCM3 эксперимент r1i1p1 [16]. Основанием для такого выбора послужили сведения о том, что эту модель отличает наиболее выраженная положительная корреляция значений атмосферного давления в пределах Сибирского антициклона, полученных в результате реанализа, а также она дает наиболее близкие к реальным значения зимних температур [17, 18]. Кроме этого, модель имеет достаточно густую сеть расчетных значений — размер ячейки в пределах горных районов Российской Федерации изменяется от $1.122^{\circ} \times 1.125^{\circ}$ до $1.118^{\circ} \times 1.125^{\circ}$, что в условиях отсутствия региональных моделей изменения климата для горных районов России позволяет оценивать изменения на относительно небольших по площади территориях. Последний период, по которому выполнялся реанализ, — 1991–2000 гг. Он был принят в качестве «современного», и по отношению к нему выполнялись расчеты изменений искомым параметров в будущем. Расчеты выполнены на середину (2041–2050) и конец (2091–2100) XXI века.

На указанные периоды для узлов сетки (рис. 1) рассмотренной климатической модели (в пределах границ лавиноактивных и потенциально лавиноактивных территорий [19]) были рассчитаны средние значения требуемых климатических параметров [20]: температуры воздуха января, суммы значений температуры воздуха за октябрь – январь – апрель, суммы осадков холодного периода (ноябрь – март).

По зависимостям были определены средние значения: многолетней максимальной декадной высоты снежного покрова, числа дней со снежным покровом, продолжительности лавиноопасного периода и повторяемости лавин для узлов сетки рассмотренной климатической модели в указанных выше временных промежутках.

По полученным данным с использованием инструментов ArcGIS (Spatial Analyst) были построены растры значений рассчитанных показателей и соответствующие им карты. По разности значений параметров за разные периоды с использованием ArcGIS также были построены поверхности, характеризующие их изменения.

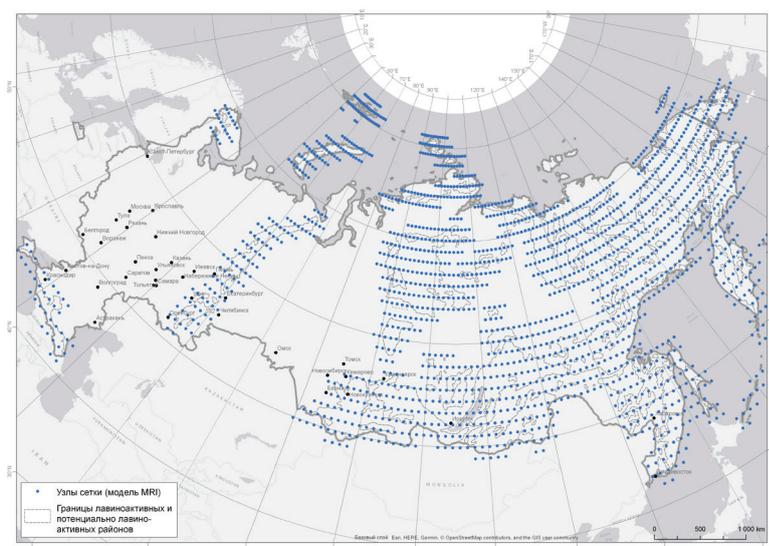


Рис. 1. Сеть расчетных значений климатической модели MRI-CGCM3 из ансамбля CMIP 5 сценария RCP 8.5 МГЭИК (IPCC).

Определение показателей лавинной активности

В настоящей работе использованы зависимости показателей лавинной активности от лавиноидентификационных характеристик климата [20]. Они были построены по фактически данным на основе обобщения материалов наблюдений за лавинами снеговалинных станций Госкомгидромета.

Среднегодовое максимальное декадное количество снежного покрова определяется в зависимости от температуры воздуха января и суммы осадков холодного периода (ноябрь – март), установленной и проверенной по данным 700 горных и равнинных метеостанций бывшего СССР, исключая те из них, где метелевый перенос снега оказывает существенное влияние на точность измерения осадков [10]. Коэффициент корреляции данных по отдельным метеостанциям и соответствующих кривых оказался не менее 0.8–0.9. На основе сопоставления карт, составленных этим методом, и контрольных карт из региональных атласов [21] принято считать рассмотренный метод приемлемым для построения мелкомасштабных карт среднегодовое декадное количество снежного покрова. Его применение ограничивается территориями, для которых имеются карты или данные о сумме осадков холодного периода, точность — преимущественно точностью последних [20].

Число дней со снежным покровом определяется в зависимости от суммы средних месячных значений температуры воздуха за октябрь–январь–апрель и суммы осадков холодного периода (ноябрь – март). Эта зависимость была построена по данным более 800 метеостанций СССР и проверена путем сравнения определенных по графикам и фактических величин числа дней со снежным покровом по данным 228

метеорологических станций, расположенных в горах Сибири, Кавказа и Средней Азии на высоте более 1000 м [11]. Проверка показала, что для Сибири коэффициент корреляции снятых с графика и фактических величин составил 0.8, для других районов он близок к 0.9 [20].

Продолжительность лавиноопасного периода определяется среднегодовое декадное количество снежного покрова и числом дней со снежным покровом. Величина продолжительности лавиноопасного периода, естественно, меньше числа дней со снежным покровом. Для определения разности между ними были проанализированы сведения о типичном ходе изменений высоты снежного покрова в течение зимы [11]. При этом установлено, что разница закономерно изменяется в зависимости от среднегодовое декадное количество снежного покрова

Средняя многолетняя повторяемость лавин определялась в зависимости от среднегодовое максимальной декадное количество снежного покрова и средней температуры самого холодного месяца, предложенной Л.А. Канаевым и К.Л. Абдушешвили [20]. Учитывались только крупные лавины, достигающие дна долины. Если в зависимость включать и мелкие лавины, останавливающиеся на склоне, общее число лавин стало бы в 2–3 раза больше [20].

Полученные результаты

На основе полученных данных и рассмотренных выше зависимостей для трех выбранных периодов были определены значения среднегодовое максимальной декадное количество снежного покрова, число дней со снежным покровом, продолжительность лавиноопасного периода и повторяемости лавин. В результате были построены карты среднегодовое максимальной декадное количество снежного покрова (рис. 2) и продолжительности лавиноопасного периода (рис. 3) в разные временные

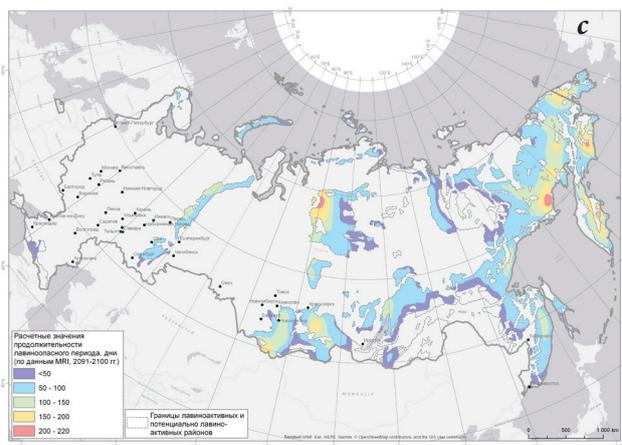
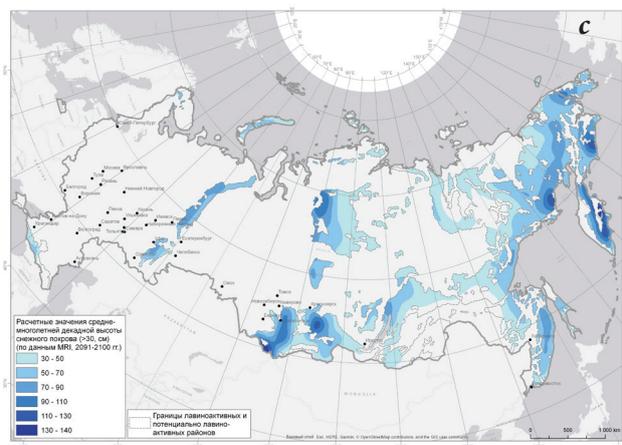
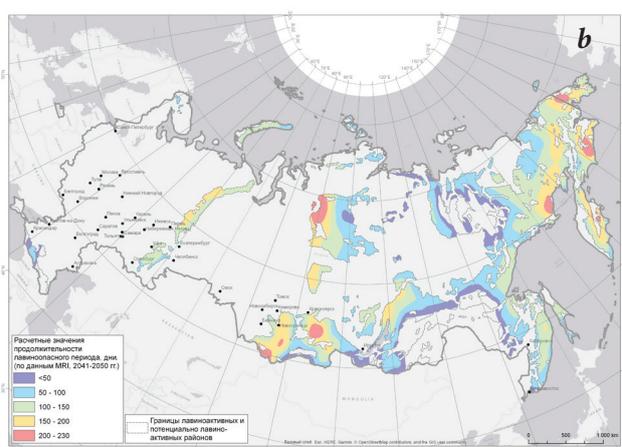
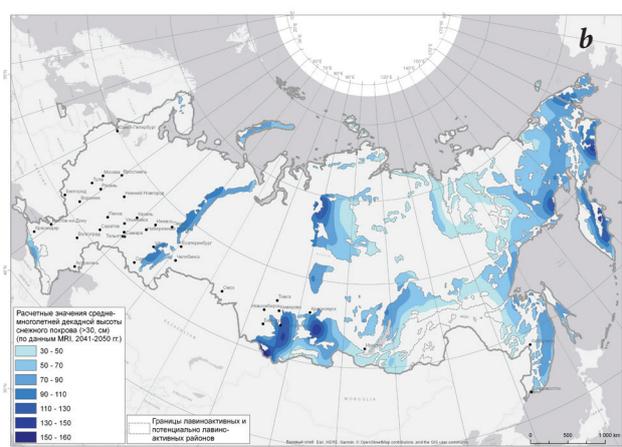
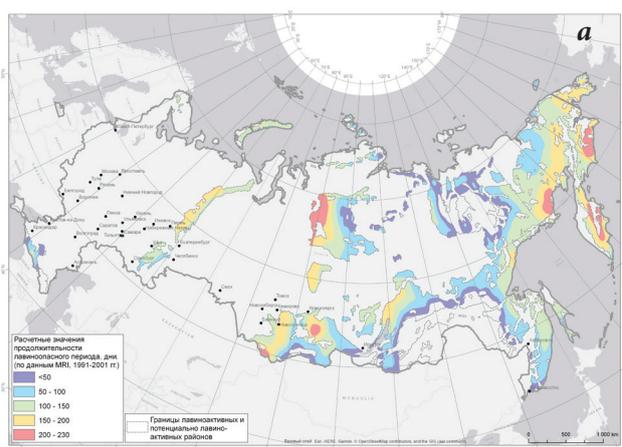
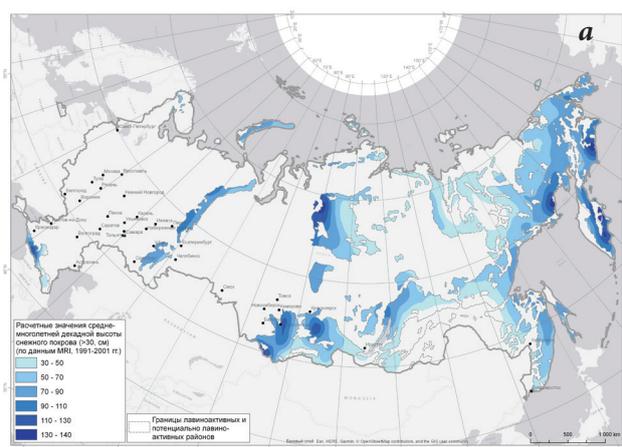


Рис. 2. Среднеголетняя максимальная расчетная декадная высота снежного покрова: а — «современный» период; б — в середине XXI века; с — в конце XXI века.

Рис. 3. Расчетная продолжительность лавиноопасного периода: а — в «современный» период; б — в середине XXI века; с — в конце XXI века.

периоды, а также карты, иллюстрирующие прогнозируемые в рамках рассмотренного сценария изменения в качественных (рис. 4) и количественных (рис. 5-6) показателях.

Выводы

Установлено, что при реализации рассмотренного сценария к середине XXI века, несмотря на повсеместный

рост температуры воздуха января, на большей части Урала, Алтае, Саянах, Сихотэ-Алине, Сахалине, во внутриконтинентальных районах северо-восточной части России происходит увеличение среднеголетней максимальной декадной высоты снежного покрова. Увеличение высоты снежного покрова связано с увеличением количества осадков, выпадающих в зимний период (ноябрь – март) на большей части территории Российской Федерации. Изменение отражает в целом существующие тренды изменения высоты снежного покрова, отмечаемые в ежегодных

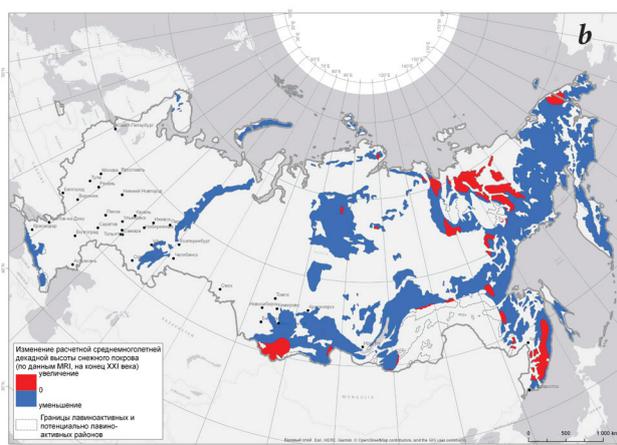
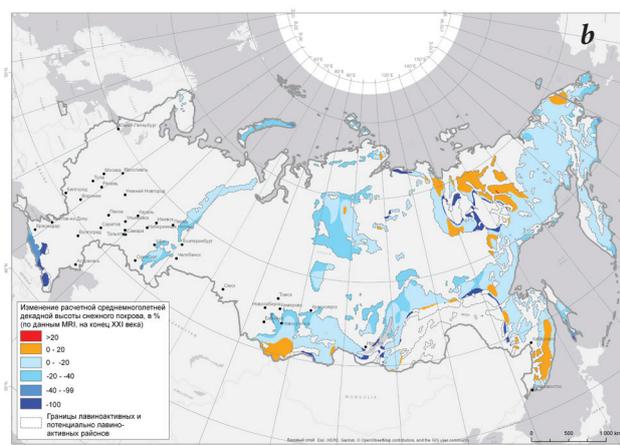
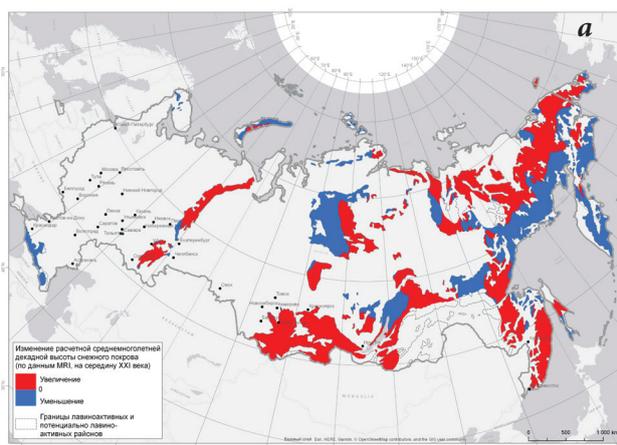
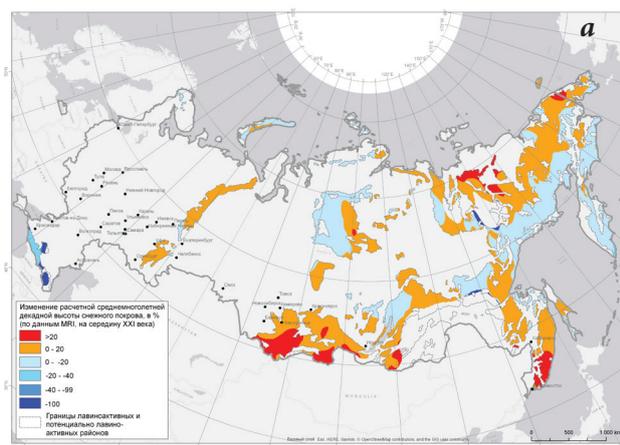


Рис. 4. Изменение (%) расчетной среднесезонной максимальной декадной высоты снежного покрова относительно «современного» периода: а – в середине XXI века; б – в конце XXI века.

Рис. 5. Изменение расчетной среднесезонной максимальной декадной высоты снежного покрова относительно «современного» периода: а – в середине XXI века; б – в конце XXI века.

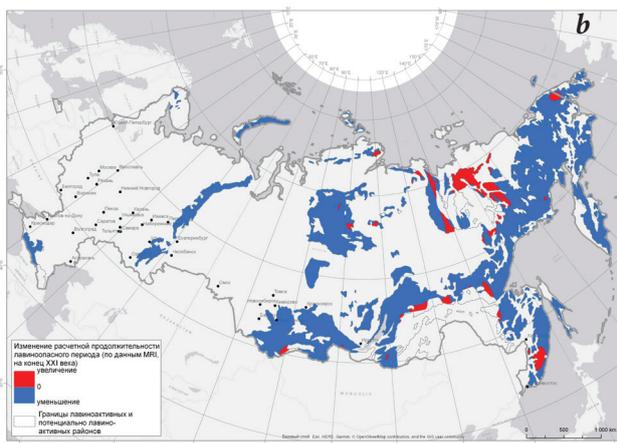
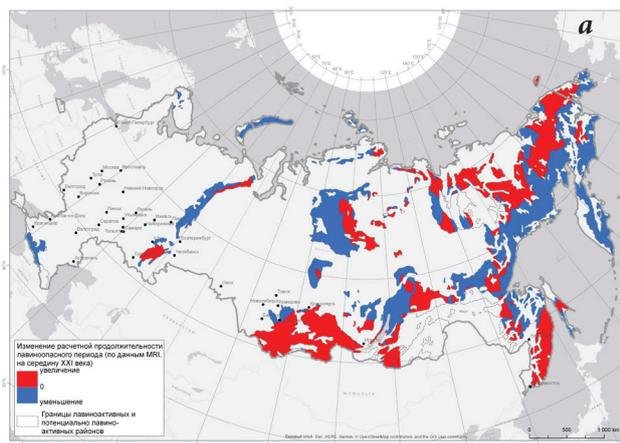


Рис. 6. Изменение расчетной продолжительности лавиноопасного периода относительно «современного» периода: а – в середине XXI века; б – в конце XXI века.

отчетах Росгидромета. И только на Кавказе, в горах прибрежной части северо-востока страны, на западе плато Путорана к середине XXI века должно произойти уменьшение высоты снежного покрова.

К концу XXI века глобальное повышение температуры, прогнозируемое выбранной моделью и сценарием, всё же приведет к уменьшению высоты снежного покрова на большей части территории страны. Как следствие увеличения высоты снежного

покрова, к середине XXI века ожидается увеличение продолжительности лавиноопасного периода на Южном Урале, Алтае, Приморье, в горах внутриконтинентальной части северо-востока России. В указанных районах возможно увеличение лавинной опасности. К концу XXI века уменьшение продолжительности ла-

Abstract

The requirements for the calculation of indicators of avalanche activity determined by climatic conditions in the territories under developing, as well as prognosis of their changes in the future are enshrined in Russian Federation legislation. However, the data required for this do not exist for all the regions of the country, especially those, that are only now included in the industrial exploration. The dependences between the climatic and the geomorphological indicators and parameters of avalanches and avalanche activity are developed earlier on the basis of data from direct observations. The indicators are based on the average annual maximum ten-day snow cover height, the number of days with snow cover, the duration of the avalanche period and the average long-term frequency of avalanches. The climatic parameters presented by model MRI-CGCM3 (RCP 8.5) were incorporated into these dependences system. This made possible to estimate the indicators of avalanche activity for the middle and for the end of the 21st century. Also, their changes relative to the present conditions were assessed. Thus, a methodology was successfully tested that allows to include normatively defined characteristics of avalanche activity in the analysis and forecasts of regional climate changes for any climate scenarios.

Keywords: snow avalanche, avalanche activity, climate change, CMIP5, MRI-CGCM3.

**The work was financially supported by RFBR and RGS (projects 18-05-60080 and 15/2019/RGS-RFBR).*

Images & Tables

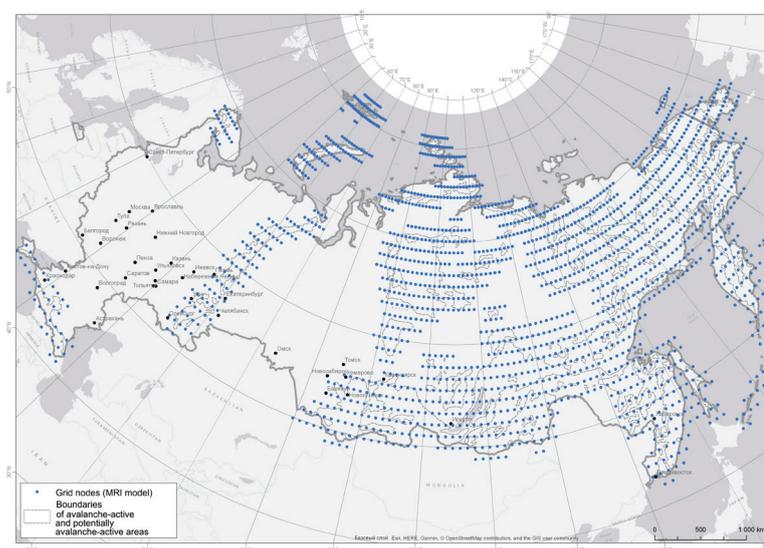


Fig. 1. MRI-CGCM3 Climate Model Design Network from CMIP 5 Ensemble of IPCC RCP 8.5 Scenario.

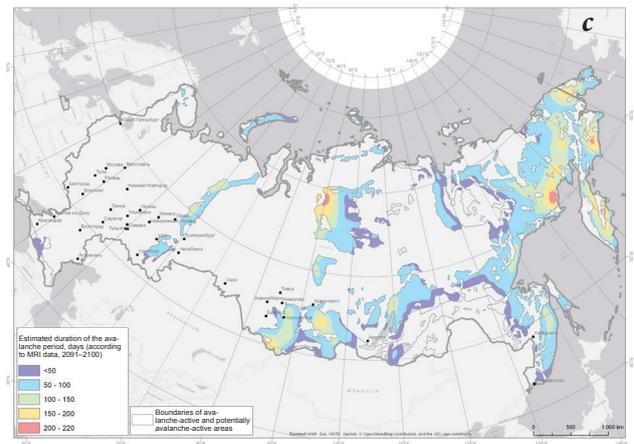
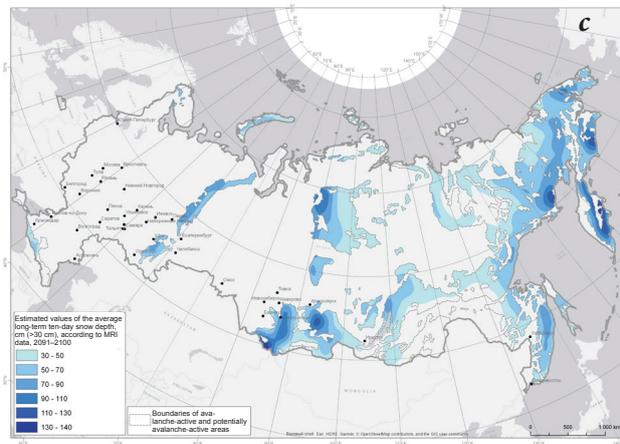
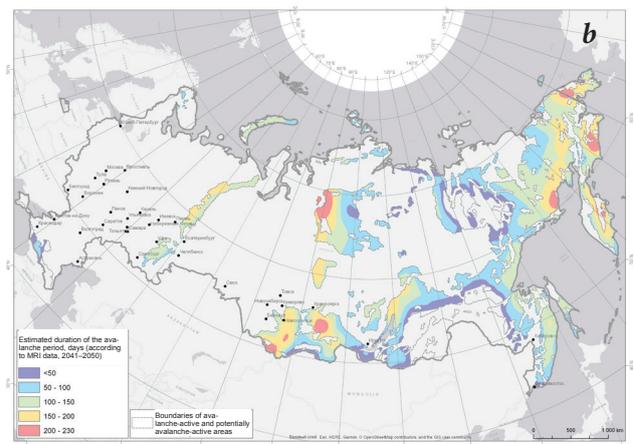
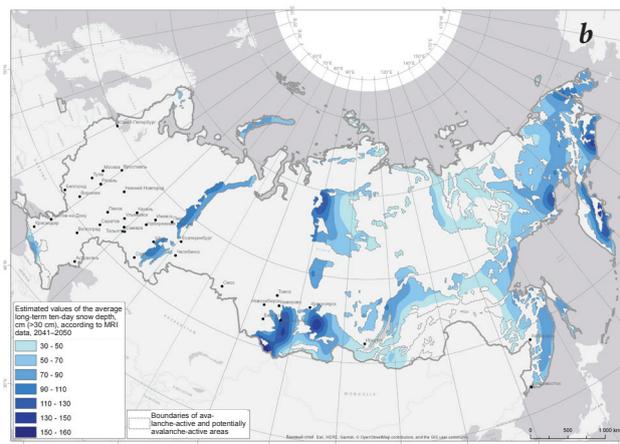
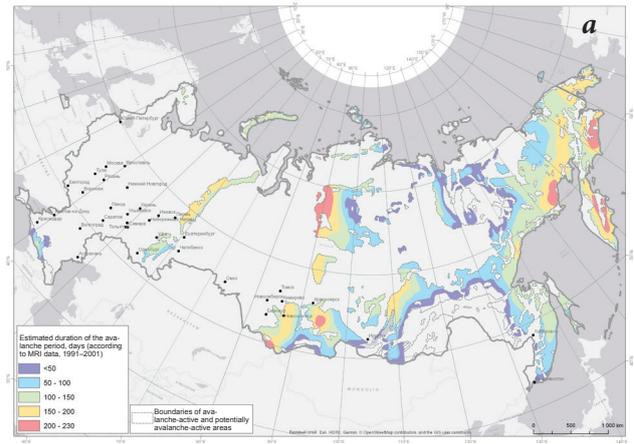
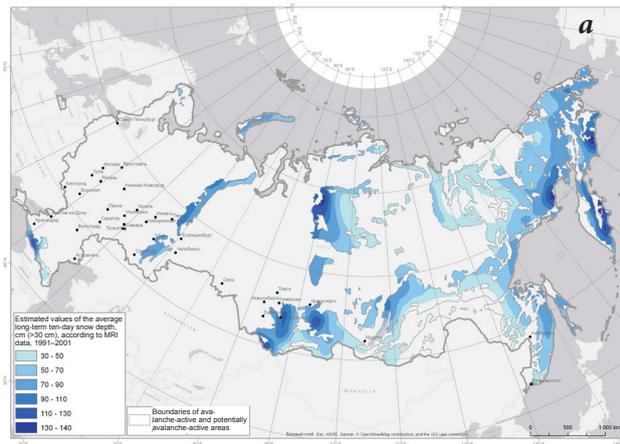


Fig. 2. Average long-term calculated maximum ten-day snow cover height: a – in the «present» period; b – in the middle of the 21st century; c – at the end of the 21st century.

Fig. 3. Estimated duration of the avalanche period: a – in the «present» period; b – in the middle of the 21st century; c – at the end of the 21st century.

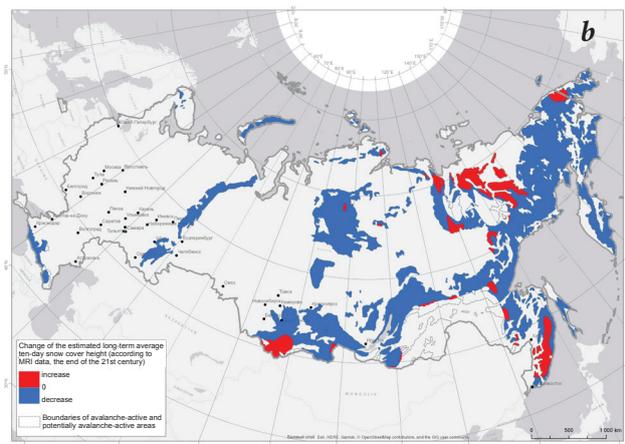
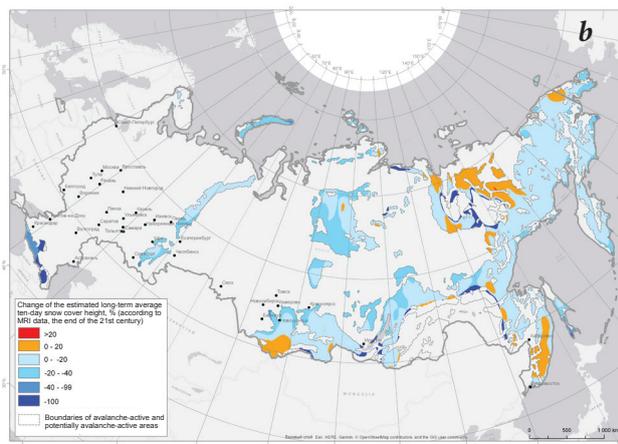
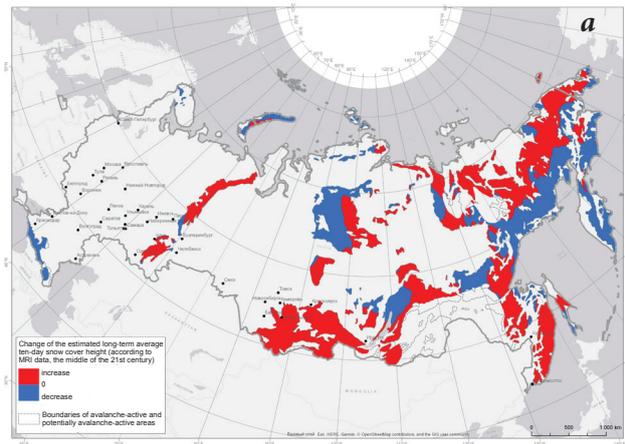
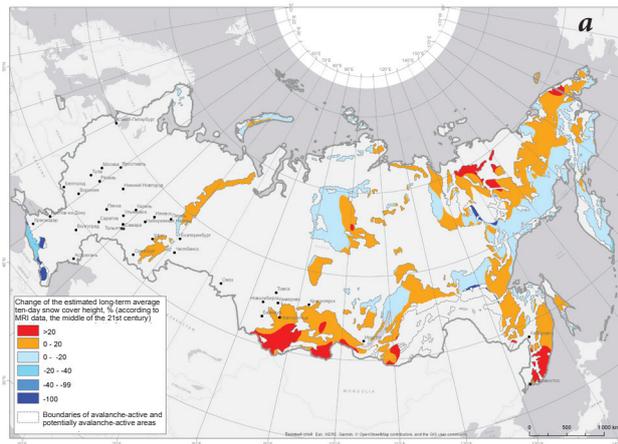


Fig. 4. Change (%) of the estimated long-term average maximum ten-day snow cover height relative to the «present» period: a – in the middle of the 21st century; b – at the end of the 21st century.

Fig. 5. Changes in the estimated long-term average maximum ten-day snow cover height relative to the «present» period: a – in the middle of the 21st century; b – at the end of the 21st century.

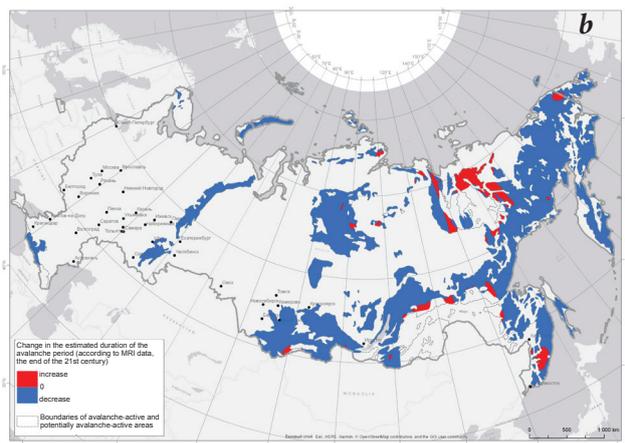
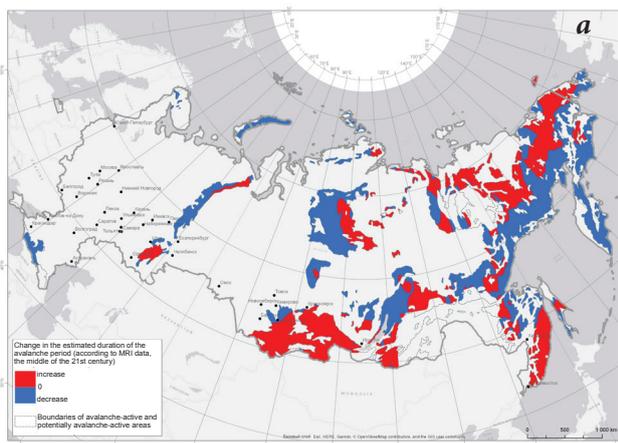


Fig. 6. Change in the estimated duration of the avalanche period relative to the «present» period: a – to the middle of the 21st century; b – at the end of the 21st century.

References

1. **M.A. Vikulina, A.L. Shmyrkov**
Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy [Data of Glaciological Studies], 2008, №105, 12 (in Russian).
2. *Building Codes 428.1325800.2018 "Engineering Surveys for Construction in Avalanche Areas. General Requirements" [SP 428.1325800.2018 "Inzhenernyye izyskaniya dlya stroitelstva v lavinoopasnykh rayonakh. Obshchie trebovaniya"]*, RF, Moscow, Ministry of Construction of Russia, 2018, 58 pp. (in Russian).
3. *Federal Law №384-FZ, Dec. 30, 2009 (as amended on Jul. 2, 2013) "Technical Regulations on the Safety of Buildings and Structures" [Federalny zakon ot 30.12.2009 №384-FZ (red. ot 02.07.2013) «Tekhnichesky reglament o bezopasnosti zdany i sooruzheniy»]* (in Russian). (<https://www.minstroyrf.gov.ru/docs/1241>).
4. *IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, UK, Cambridge, and USA, NY, New York, Cambridge University Press, 2022, 3056 pp.
DOI: 10.1017/9781009325844.
5. *The 2nd Assessment Report of Roshydromet on Climate Change and Its Consequences on the Territory of the Russian Federation, Vol. 1, Keynote [Vtoroy otsenochnyy doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiyskoy Federatsii, t. 1, osnovnoy]*, RF, Moscow, Publ. Rosgidromet, 2014, 1008 pp. (in Russian).
6. **G.K. Tushinsky**
Protection of Highways from Avalanches [Zashchita avtomobilnykh dorog ot lavin], USSR, Moscow, Avtotransizdat, 1960, 152 pp. (in Russian).
7. **K.S. Losev**
Avalanches of the USSR (Distribution, Zoning, Forecasting Capabilities) [Laviny SSSR (rasprostraneniye, rayonirovaniye, vozmozhnosti prognoza)], USSR, Leningrad, Gidrometeoizdat, 1966, 129 pp. (in Russian).
8. **T.G. Glazovskaya, S.M. Myagkov, V.F. Okolov, E.S. Troshkina**
In World Atlas of Snow and Ice Resources, Vol. II, Ed. V.M. Kotlyakov, RF, Moscow, Institute of Geography RAS, 1997, pp. 125–132.
9. **T.G. Glazovskaya, S.M. Myagkov, V.F. Okolov**
Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy [Data of Glaciological Studies], 1978, №34, 50 (in Russian).
10. **V.F. Okolov**
In Coll. Art. "Mapping of Avalanche-Prone Areas on a Medium Scale" [Kartografirovaniye lavinoopasnykh territoriy v srednem masshtabe], Dep. VINITI №1625-V86, USSR, Moscow, VINITI, 1986, pp. 111–121 (in Russian).
11. **V.F. Okolov**
In Coll. Art. "Mapping of Avalanche-Prone Areas on a Medium Scale" [Kartografirovaniye lavinoopasnykh territoriy v srednem masshtabe], Dep. VINITI №1625-V86, USSR, Moscow, VINITI, 1986, pp. 121–126 (in Russian).
12. **R.L. Armstrong, B.R. Armstrong**
In Avalanche Formation, Movement and Effects: Proc. Davoco Symposium, Sept. 1986, IAHS "Red Books" Publ. no. 162, Eds B. Salm, H. Gubler, UK, Oxon, Wallingford, International Association of Hydrological Sciences, 1987, pp. 281–294.
13. **C.J. Mock, K.W. Birkeland**
Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, **81**(10), 2367.
DOI: 10.1175/1520-0477(2000)081<2367:SACOTW>2.3.CO;2.
14. **B. Shandro, P. Haegeli**
Nat. Hazards Earth Syst. Sci., 2018, **18**(4), 1141.
DOI: 10.5194/nhess-18-1141-2018.
15. *Building Codes 115.13330.2016 "SNR 22-01-95 Geophysics of Natural Hazards" [SP 115.13330.2016 "SNiP 22-01-95 Geofizika opasnykh prirodnykh vozdeystviy"]*, RF, Moscow, Ministry of Construction of Russia, 2016, 40 pp. (in Russian).
16. **S. Yukimoto, Y. Adachi, M. Hosaka, T. Sakami et al.**
J. Meteorolog. Soc. Jpn. Ser. II, 2012, **90A**, 23.
DOI: 10.2151/jmsj.2012-A02.
17. **Ch. Miao, Q. Duan, Q. Sun, Y. Huang, D. Kong, T. Yang, A. Ye, Zh. Di, G. Wei**
Environ. Res. Lett., 2014, **9**(5), 055007.
DOI: 10.1088/1748-9326/9/5/055007.
18. **F. Li, Y.-Q. Gao**
Atmos. Oceanic Sci. Lett., 2015, **8**(4), 179.
DOI: 10.3878/AOSL20140101.
19. *World Atlas of Snow and Ice Resources, Vol. I [Atlas snezhnoledovykh resursov mira, t. I]*, Ed. V.M. Kotlyakov, RF, Moscow, Publ. Institute of Geography RAS, 1997, 392 maps (in Russian).
20. *Avalanche Geography [Geografiya lavin]*, Eds S.M. Myagkov, L.A. Kanaev, RF, Moscow, MSU Publ., 1992, 332 pp. (in Russian).
21. **T.G. Glazovskaya, S.M. Myagkov**
Materialy glyatsiologicheskikh issledovaniy [Data of Glaciological Studies], 1978, №34, 46 (in Russian).