УДК 504.75.06:332.362:911.9

ВОЗМОЖНОСТИ ОЦЕНКИ ДАЛЬНОСТИ ВЫБРОСА ЛАВИН НА КРАСНОЙ ПОЛЯНЕ ПРИ ОТСУТСТВИИ ДАННЫХ ПРЯМЫХ НАБЛЮДЕНИЙ

© 2025 г. Е.Д. Жукова*, А.С. Турчанинова, Н.В. Коваленко, Д.А. Петраков

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия *e-mail: zhukova.geo@mail.ru

> Поступила 12.10.2024 г. После доработки 03.12.2024 г. Принята к печати 25.12.2024 г.

Выполнена оценка дальности выброса лавин на неосвоенном участке северного склона хребта Аибга на Красной Поляне. Проанализированы преимущества и недостатки применения разных подходов к оценке дальности выброса лавин в природных условиях с ярко выраженными фитоиндикационными признаками. Отражена значимость подхода, сочетающего в себе несколько методов, при определении количественных параметров лавин заданной обеспеченности.

Ключевые слова: снежная лавина, дальность выброса лавины, лавинная опасность, математическое моделирование, RAMMS

DOI: 10.31857/S2076673425010057, EDN: GZHSSJ

введение

Развитие существующих горнолыжных курортов в России (курорты Красной Поляны, Архыз, Домбай, Эльбрус и др.) и проектирование новых (Парк 3 вулкана, Мамисон, Ведучи и др., (https://кавказ.рф) требует детальной оценки лавинной опасности. Ряд этих проектов реализуется в тех горных районах, где снеголавинных наблюдений нет, фактические данные о сходе лавин отсутствуют или представлены эпизодическими наблюдениями. В этом случае особенно актуальным становится выбор наиболее достоверной методики, максимально точно оценивающей границы зон распространения лавин разной повторяемости для принятия обоснованных решений по размещению проектируемых сооружений и их защиты.

Сход снежных лавин оказывает значительное влияние на растительность, особенно в районах со зрелым лесом. Одними из косвенных признаков лавинной опасности территории служат геоботанические, например, уничтожение растительности, замена видов, запаздывание фенологических фаз и другие. На основе ландшафтно-индикационного метода по выраженности следов лавинной деятельности в лесной растительности можно определить лавинный режим — тип лавин, границы их распространения, давление, а также повторяемость схода (Акифьева, 1980). Это характерно и для района Красной Поляны, где есть лавинные прочёсы. Подробнее метод рассмотрен ниже.

Рекомендуемый к использованию в отечественной практике нормативный документ для расчёта количественных параметров снежных лавин это СП 428.1325800.2018. Он опирается на работу В.П. Благовещенского (1991) с рядом уточнений. В данном нормативе для оценки дальности выброса в неизученных районах (приложение Б) рекомендовано использование графоаналитического метода. Метод наследует модель материальной точки (Козик. 1962; Perla et al., 1980; Lied, Bakkehøi, 1980 и др.) и основан на статистической обработке большого массива фактических данных. Преимущества методики заключаются в её относительной простоте, удовлетворительном расчёте дальности выброса и скорости лавин, а недостаток - в отсутствии методики оценки боковых границ распространения лавин.

При этом в пункте 4.11.37 СП 428.1325800.2018 указана возможность использования математического моделирования для оценки количественных параметров снежных лавин. Модели гидравлического типа (к примеру, модель Фельми-Зальма (Voellmy, 1955; Salm, 1965) используются для описания поведения снежной лавины, которая движется как жидкость под действием гравитации. Эти модели основаны на законах сохранения массы, импульса и энергии, а также уравнении неразрывности. Такие модели, например, Aval-1D (одномерная), RAMMS, SamosAT (двумерные) широко используются в зарубежной практике оценок лавинной опасности и имеют удобный пользовательский интерфейс. Двумерные модели движения лавин позволяют получать, в том числе, боковые границы растекания лавин на основе цифровой модели рельефа с учётом заданных коэффициентов трения, определяемых полуэмпирическим путём.

В качестве места исследования выбран неосвоенный северный склон хребта Аибга, расположенный восточнее горного курорта «Роза Хутор». Преимуществом данного участка являются хорошо выраженные в растительности признаки лавинной деятельности — лавинные прочёсы. По границам смены растительности представляется возможным оценить достоверность расчётных границ дальности выброса лавин разной обеспеченности на основе фактической информации о характере растительности, полученной в результате рекогносцировочного обследования и анализа данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ).

Авторы сознательно не оценивали параметры лавин на существующих курортах, поскольку в настоящее время там производятся принудительные спуски лавин, и лавины больше не достигают своих предельных размеров, то есть естественные природные границы могут быть стёрты и не актуальны. Для определения количественных параметров лавин заданной обеспеченности авторы сопоставили возможности использования методики, рекомендуемой в приложении Б СП 428.1325800.2018 (статистическое моделирование), и двумерной математической модели RAMMS, которая ранее широко применялась для оценки дальности выброса лавин в районе исследования (Коровина и др., 2021).

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЛАВИН В РАЙОНЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Рельеф. Хребет Аибга простирается с северо-запада на юго-восток параллельно Главному Кавказскому хребту и служит составной частью Южного Передового хребта, разделяя долины рек Мзымта и Псоу. Глубина расчленения рельефа на участке исследования превышает 1800 м (от 700 м в днище долины р. Мзымта до 2509 м, гора Каменный Столб). Особенностью рельефа является его сложность: преобладают деформированные кары, разделяющиеся на несколько камер, из которых лавины могут сходить как по отдельности в случае схода регулярных относительно небольших по объёмам лавин, так и одновременно в случае схода лавин больших объёмов; разные кары и денудационные воронки имеют общие зоны транзита и/или отложения; перегибы склонов; склоны довольно крутые от 20-35 до 50-70°. Основная часть территории соответствует диапазону углов наклона (от 25 до 60°), в котором сход лавин наблюдается чаще всего (Божинский, Лосев, 1987; Благовещенский, 1991).

Климат. Основные характеристики климата и лавинного режима описаны в (География лавин, 1992; Трошкина, 1992; Атлас..., 1997). Высота снежного покрова изменяется в большом диапазоне и зависит от микрорельефа и экспозиции склона. Средняя многолетняя высота снежного покрова в высотном интервале образования крупных снежных лавин (2200–2300 м) превышает 3 м, при максимальной около 8 м по данным м/с «Ачишхо», 1880 м (Погорелов, 2002; Заруднев, 2004).

Регулярных снеголавинных наблюдений непосредственно на участке исследования не проводилось, хотя имеются наблюдения противолавинных служб (ПЛС) на сопредельных горнолыжных курортах (ГК) на Красной Поляне.

Среднее многолетнее значение максимальной за год высоты снежного покрова в 2007-2024 гг. на основе анализа данных снегомерных реек противолавинной станции горного курорта (ПЛС ГК) «Роза Хутор» изменяется в диапазоне от 175 см на высоте 1000-1100 м до 343 см на высоте 2200-2500 м (табл. 1). Данные фактических наблюдений в целом хорошо согласуются с оценками (Погорелов, 2002), но в отдельных интервалах высот (1200-1400 м) превышают их. Следует отметить, что среднемаксимальная высота снежного покрова на метеостанции «Красная Поляна» в 2008/09-2021/22 гг. составила 66 см (https://rp5.ru/), что ниже среднего многолетнего значения 72 см (Научно-прикладной справочник «Климат России» 2000, 2011 и 2024 гг. ВНИИГМИ-МЦД). Поэтому в среднемаксимальные значения высоты снежного покрова были внесены

Таблица 1. Среднее многолетнее значение максимальной за год высоты снежного покрова *h* (ПЛС Роза-Хутор, данные 2008/09–2021/22 гг.) и рассчитанная по СП 428.1325800.2018 максимальная декадная высота снежного покрова 1%-й обеспеченности

Абс. высота, км	Среднемакси- мальная высота снежного покрова <i>h</i> , см	Высота снежного покрова 1%-й обеспеченности <i>h</i> _{1%} , см
0.8-1.0	131	225
1.0-1.2	175	295
1.2-1.4	214	347
1.4-1.6	269	426
1.6-1.8	327	527
1.8-2.0	344	547
2.0-2.2	338	531
2.2-2.5	343	537

ЛЁД И СНЕГ том 65 №1 2025

коррективы, учитывающие пониженную снежность периода 2009—2022 гг. Обеспеченные значения высоты снежного покрова рассчитывались методом Монте-Карло, рекомендуемым СП 428.1325800.2018, число случайных чисел составляло 1000.

Отмечено, что интенсивность выпадения твёрдых осадков на хребте Аибга может быть очень велика (Олейников, 2010; Олейников, Володичева, 2020). За один снегопад, который может длиться несколько суток, может выпасть от 0.5 до 1.5 м и более нового снега (География лавин, 1992; Казаков и др., 2012; Коровина и др., 2021). Анализ данных фактических наблюдений за лавинами на территории горного курорта «Роза Хутор» за период наблюдений 2007–2024 гг. показал, что наиболее крупные лавины на Красной Поляне сходят, как правило, вовремя или сразу после снегопадов.

Помимо снегопадов, на зарождение лавин на хребте Аибга влияет метелевый перенос. По наблюдениям снеголавинной станции (СЛС) «Аибга», преобладающие направления ветров в пригребневой зоне хребта — южное и юго-западное. Это способствует метелевому переносу снега с южного склона на северный, а также образованию снежных карнизов в пригребневой зоне хребта Аибга. Среднемесячная температура воздуха в январе по мере увеличения высоты местности уменьшаются от плюс 0.8 °С (метеостанция Красная Поляна, 566 м) до минус 5.9 °С (на высоте 2250 м).

Растительность. На участке исследования произрастает зрелый пихтовый и буково-пихтовый лес (толщина стволов достигает в среднем более 60 см в неподверженных воздействию лавин зонах) с выраженными участками без леса или с криволесьем (лавинными прочёсами). До абсолютных высот около 1500 м отмечаются практически полностью залесённые склоны, а выше до абсолютных высот 1900 м – частично залесённые водоразделы. Выше 1900 м лесная растительность почти повсеместно отсутствует. Преобладает альпийская растительность, представленная разнотравьем и кустарниками – рододендронами. На этих участках отмечается высокая степень задернованности. На склонах имеются чётко выраженные лавинные прочёсы в лесу – вытянутые вдоль зоны транзита участки без древесной растительности или с молодой порослью ольхи, граба и бука, как правило, шириной до 50 м (рис. 1). В районе исследования отмечены случаи схода небольших по объёму снежных лавин со склонов, занятых древесной растительностью (Казаков и др., 2012; Казакова и др., 2020).

Таким образом, благоприятные факторы лавинообразования — альпийский рельеф со значительной крутизной склонов, интенсивные снегопады и большое количество твёрдых осадков, а также характер растительности — обеспечивают высокую лавинную активность.



Рис. 1. Неосвоенный северный склон хребта Аибга, на котором отчётливо прослеживаются лавинные прочёсы. Фото А.С. Турчаниновой, март 2022 г.

Fig. 1. The undeveloped northern slope of the Aibga ridge, on which avalanche sweeps are clearly visible. Photo by A.S. Turchaninova, March 2022

МЕТОДИКА И МАТЕРИАЛЫ

Для оценки границ распространения лавин в летний период 2021 г. выполнено полевое пешее и аэровизуальное рекогносцировочное обследование изучаемой территории с целью поиска следов воздействия лавин, выраженных в ландшафте, а также определения характера подстилающей поверхности и растительности в лавиносборах.

После полевого этапа проведён комплекс камеральных работ, который включал в себя: дешифрирование космических и ортофотоснимков; статистическое моделирование параметров снежных лавин согласно СП 428.1325800.2018; математическое моделирование снежных лавин в программе RAMMS; геоинформационное картографирования границ распространения лавин. Подчеркнём, что небольшие лавины, формирующиеся в лесу на потенциальных лавиноопасных склонах, не рассматривались.

Рассчитанные параметры лавин могут различаться из-за разного подхода к выделению зон зарождения. Боковые границы лавинных очагов проводились по положительным перегибам рельефа (гребням, выходам скал, заломам в горизонталях). Границы лавинных очагов уточнялись с учётом характера растительности на основе дешифрирования аэро- (полученных с БПЛА, MavicPro, в сентябре и октябре 2021 г.), ортофотопланов, составленных на основе аэрофотосъёмки (2014 и 2021 гг.),

ЛЁД И СНЕГ том 65 № 1 2025

и космических снимков (доступных в сети Интернет через сервисы QGIS). В действующих нормативных документах и научных работах до сих пор нет критерия, который бы позволил чётко разделять лавинные очаги, в которых формируются лавины определённой повторяемости. В условиях массового схода лавин при особо благоприятных для лавинообразования условиях снегонакопления даже обособленные лавинные очаги могут срабатывать единовременно в виде лавин, что уже наблюдалось ранее на соседней территории ГК «Роза Хутор». На рассматриваемой территории практически повсеместно наблюдаются сложные многокамерные формы рельефа, которые очень сложно, а иногда невозможно разделить между собой на лавинные очаги при условии отсутствия данных фактических наблюдений за лавинами в них. Не исключено единовременное формирование лавин из нескольких лавинных очагов.

Ландшафтно-индикационный метод. Для установления границ дальности выброса лавин разной повторяемости использован ландшафтно-индикационный метод (Акифьева, 1980). На основе ортофотоснимка с разрешением 20 см (дата съёмки – сентябрь 2021 г.), предоставленного ГК «Роза Хутор», выполнено дешифрирование границ следов действия лавин, в зависимости от смены видового состава, возраста и высоты древостоя (рис. 2), которая определяется по дешифровочным признакам на ортофотоснимке с учётом полевой верификации. Луга перекрываются лавинами несколько раз в год. Кустарники и берёзовое криволесье высотой до 10 м перекрываются лавинами ежегодно; лавины, уничтожающие взрослый буковый лес высотой до 20 м, сходят через 40-60 лет. Зрелый пихтовый лес, примыкающий к лавиноопасной зоне и достигающий высоты 30 м, поражается лавинами раз в 50 лет и уничтожается катастрофическими лавинами раз в 200 лет (Акифьева, 1980).

Таким образом, результаты количественных расчётов дальности выброса снежных лавин определённой повторяемости должны согласовываться с фитоиндикационными границами, четко выраженными на местности и снимках.

Методика СП 428.1325800.2018. В отечественном лавиноведении широко известен графоаналитический метод С.М. Козика (1962), который положен в основу СП 428.1325800.2018 для определения дальности выброса и скорости лавины. Математическая модель одномерна, т.е. расчёты выполняются вдоль линии продольного профиля и, несмотря на простоту расчётов, имеет ряд ограничений. Она не позволяет учесть особенности сложного рельефа на участке исследования, отсутствует возможность учёта растекания лавины по неровностям рельефа (для определения ширины лавины в СП 428.1325800.2018 нет соответствующих формул) с учётом характера растительности и особенно на конусах выноса в днищах долин. В том числе не всегда очевидно, как именно проводить продольные профили. Теоретически учесть растекание лавинного потока можно путём проведения нескольких расчётных профилей, но это практически невозможно выполнить, если следовать требованию продольного проложения профилей.

С использованием морфометрических данных лавинных очагов, а также значений снежно-метеорологических параметров, по таблицам Б.6 и Б.7 СП 428.1325800.2018 были определены значения коэффициентов общего сопротивления движению лавин (или tgψ). Согласно СП 428.1325800.2018, обеспеченность значения tgψ соответствует обеспеченности водозапаса в зоне зарождения лавин. Водозапас в зонах зарождения принимался равным 600 мм для определения дальности выброса лавин редкой повторяемости как наибольший из возможных, согласно рекомендациям СП 428.1325800.2018.

Математическое моделирование с использованием программы RAMMS. Для расчёта дальности выброса и границ распространения лавин использована модель RAMMS (Christen et al., 2010; Турчанинова и др., 2015; Bartelt et al., 2017), реализованная в виде программного продукта. Эта модель неоднократно была апробирована на Северном Кавказе (Турчанинова и др., 2015) и на Красной Поляне в частности (Родионова и др., 2018; Коровина и др., 2021), и показала там свою эффективность. В качестве входных параметров, от которых зависят результаты моделирования, использовались: цифровая модель рельефа (ЦМР с пространственным разрешением 5 м); границы лавинных очагов (зон зарождения) и высота формирующих лавину слоев снега; граница лесной растительности, которая влияет на значения коэффициентов трения; коэффициенты μ (сухого или кулоновского) и ζ (вязкого или турбулентного) трения, которые заданы в соответствии с рекомендациями руководства пользователя для условий Красной Поляны (RAMMS, 2017). Используемая для расчётов версия модели RAMMS не позволяет моделировать снеговоздушное облако лавин, поэтому смоделированные границы не показывают область действия воздушной волны.

Расчёт высоты формирующих лавину слоёв выполнялся по методике, рекомендованной разработчиками программы RAMMS (2017), учитывающей прирост высоты снежного покрова за трёхдневный снегопад (72 часа) с периодом повторяемости 1 раз в 100 лет. Для определения значения прироста высоты снежного покрова за трёхдневный снегопад 1%-й обеспеченности выполнен анализ данных фактических наблюдений за высотой снежного покрова на территории ГК «Роза Хутор» в 2008–2022 гг. (рис. 3, *a*, *b*) и построена кривая обеспеченности на основе распределения Гумбеля (рис. 3, *б*).



Рис. 2. Типы растительности, выделенные по мозаике ортофотоснимков (верхняя часть исследуемого участка – ортофото 2014 г., нижняя – ортофото 2021 г.). Цифрами обозначены участки: *1* – без растительности; *2* – разнотравье; *3* – кустарники и криволесье; *4* – буковый лес; *5* – пихтовый лес; *6* – граница рассматриваемого участка. Звёздочкой на схеме-врезке показано местоположение рассматриваемого участка. Подложка Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community

Fig. 2. Vegetation types identified from the mosaic of orthophotos (the upper part of the study area is an orthophoto from 2014, the lower part is an orthophoto from 2021). Numbers indicate the following areas: 1 - without vegetation; 2 - grassland; 3 - shrubs and curvilinear forest; 4 - beech forest; 5 - fir forest; 6 - site boundary. The asterisk on the inset diagram shows the location of the site under consideration. Esri, Maxar, Earthstar Geographics, and the GIS User Community

ЛЁДИСНЕГ том 65 № 1 2025

Рис. 3. (*a*) Высота снежного покрова в цирке «Роза Хутор» в период с 2008 по 2022 г. на абс. высоте около 2100 м: 1 – 2008/09 г.; 2 – 2009/10 г.; 3 – 2010/11 г.; 4 – 2011/12 г.; 5 – 2012/13 г.; 6 – 2013/14 г.; 7 – 2014/15 г.; 8 – 2015/16 г.; 9 – 2016/17 г.; 10 – 2017/18 г.; 11 – 2018/19 г.; 12 – 2019/20 г.; 13 – 2020/21 г.; 14 – 2021/22 г.

(б) Кривая обеспеченности максимальных значений прироста высоты снежного покрова (см) за трёхдневный снегопад на участке исследования

(в) Максимальные значения приростов высоты снежного покрова за трёхдневный снегопад:

 $\frac{1}{1-2008/09}$ r.; 2-2009/10r.; 3-2010/11r.; 4-2011/12r.; 5-2012/13r.; 6-2013/14r.; 7-2014/15r.; 8-2015/16r.; 9-2016/17r.; 10-2017/18r.; 11-2018/19r.; 12-2019/20r.; 13-2020/21r.; 14-2021/22r.

Fig. 3. (a) Snow cover height in the "Rosa Khutor" cirque from 2008 to 2022 at an absolute altitude of about 2100 m:

 $\frac{1-2008}{99}; 2-2009/10; 3-2010/11; 4-2011/12; 5-2012/13; 6-2013/14; 7-2014/15; 8-2015/16; 9-2016/17; 10-2017/18; 11-2018/19; 12-2019/20; 13-2020/21; 14-2021/22.$

(6) Probability of maximum values of snow height increase (cm) during a three-day snowfall in the study area

(*e*) Maximum snow height increases during a three-day snowfall:

 $\frac{1}{1-2008/09}; 2-2009/10; 3-2010/11; 4-2011/12; 5-2012/13; 6-2013/14; 7-2014/15; 8-2015/16; 9-2016/17; 10-2017/18; 11-2018/19; 12-2019/20; 13-2020/21; 14-2021/22$

При использовании рассмотренной методики оседание снежного покрова (возможно более 20% за 3 лня) прелполагалось уже косвенно учтённым. Для учёта метелевой аккумуляции снега было принято решение добавить 50% к полученным значениям приростов высоты снежного покрова, учитывая расположение территории исследования на подветренном склоне. Дополнительно был учтён средний угол наклона зон зарождения лавин на основе коэффициента устойчивости снежного покрова (f (ϕ), зависящего от крутизны склона (ф). Предполагается, что устойчивость снежного покрова снижается с увеличением угла наклона склона, то есть чем круче склоны, тем быстрее они разгружаются от снега, а на склонах круче 60° снег уже не удерживается.

Таким образом, с учётом средней абсолютной высоты лавинных очагов и их средних уклонов были рассчитаны значения высоты формирующих лавину слоёв в них (максимальных приростов снежного покрова за трёхдневный снегопад) 1%-й обеспеченности, которые составили от 1.15 до 1.81 м.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате дешифрирования ортофотоснимка с использованием ландшафтно-индикационного метода и с учётом полевой верификации составлена карта растительности (рис. 4, *a*), на которой отчётливо прослеживаются лавинные прочёсы шириной около 50 м, покрытые кустарниковым криволесьем.

Рассмотрены методики оценки параметров лавин и выполнены снеголавинные расчёты с их применением. На основе всех полученных данных на исследуемой территории авторы выделили границы 37 лавинных очагов. В RAMMS выполнено математическое моделирование лавин с периодом повторяемости 1 раз в 100 лет.

Для проведения продольных профилей по одномерной модели, согласно СП 428.1325800.2018, использованы лавинные очаги, в которых наиболее вероятно могут образовываться крупные лавины редкой обеспеченности (рис. 4. в). Рекомендации СП 428.1325800.2018 при выделении лавинных очагов несколько отличаются от рекомендаций по работе с программой RAMMS, в которой, как правило, в качестве лавинного очага рассматривается верхняя часть склона для осовов или воронокообразное расширение для канализированных лавин, где происходит единовременный отрыв пласта снега. Большинство расчётных значений tg v оказались близки к значению 0.27, рекомендованному для определения максимальной дальности выброса лавин СП 428.1325800.2018, а некоторые ещё меньше 0.27 (чем меньше $tg\psi$, тем больше расчётная дальность выброса лавин).

Лавинные прочёсы, определённые ландшафтно-индикационным методом, хорошо согласуются с результатами моделирования лавин в RAMMS (табл. 2). Профили (см. рис. 4, e) отражают максимальные рассчитанные дальности выброса из 37 лавинных очагов по методике, описанной в СП 428.1325800.2018. Только в зоне отложения лавин (на высоте 1300—1400 м) в восточной части исследованного участка результаты моделирования завышают границы дальности выброса лавин (рис. 4, e), выраженные в растительности.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Фактические данные по самым разным горным районам показывают, что толщина сорвавшегося пласта снега чаще всего находится в пределах 50—100 см и очень редко достигает 200 см, хотя высота снега при этом может быть значительно больше. При высоте снега более 300 см не обнаруживается достоверной связи толщины сорвавшегося снежного пласта с высотой снега. В таких случаях за среднее значение толщины сорвавшегося снежного пласта можно принимать 100 см, а предельные значения рассчитывать исходя из нормального закона распределения



со средним квадратическим отклонением 50 см (Благовещенский, 1991). Полученные в настоящем исследовании значения приростов высоты снежного покрова за трёхдневный снегопад согласуются с утверждениями В.П. Благовещенского

(1991), методика которого была положена в основу приложения Б СП 428.1325800.2018. Подмечено, что в данном случае речь идёт о средней высоте формирующих лавину слоёв (или толщине отрыва снега) в зоне ее зарождения, при этом значения

ЛЁДИСНЕГ том 65 №1 2025



Рис. 4. (а) Схема типов растительности:

1 – граница рассматриваемого участка; 2 – отсутствие растительности; 3 – разнотравье возрастом около 1 года; 4 – кустарники и криволесье возрастом менее 5 лет; 5 – зрелый буковый лес возрастом более 30 лет; 6 – зрелый пихтовый лес возрастом более 50 лет

(б) Максимальные значения давления лавин, рассчитанные в RAMMS:

I – граница рассматриваемого участка; *2* – зоны зарождения лавин; *3* – лавиноопасная зона, рассчитанная по RAMMS; максимальное давление моделируемых лавин, кПа: *4* – менее 1; *5* – 1–3; *6* – 3–30; *7* – 30–100; *I* – более 100

(в) Дальность выброса лавин:

1 – граница рассматриваемого участка; 2 – зоны зарождения лавин; 3 – лавиноопасная зона, рассчитанная по RAMMS; 4 – основные профили для расчёта дальности выброса лавин по СП 428.1325800.2018; цифрами на карте отмечены ключевые участки

Fig. 4. (*a*) Vegetation map:

1 – site boundary; 2 – absence of vegetation; 3 – mixed grass with the age of about 1 year; 4 – shrubs and brushwood with the age of less than 5 years; 5 – mature beech forest with the age of more than 30 years; 6 – mature fir forest over 50 years old (δ) Maximum avalanche pressure values calculated in RAMMS:

1 – site boundary; 2 – avalanche release zones; 3 – avalanche danger zone calculated with RAMMS; maximum pressure of modeled avalanches, kPa: 4 – less than 1; 5 – 1–3; 6 – 3–30; 7 – 30–100; 1 – more than 100

(*s*) Avalanche run-out distance:

I – site boundary; 2 – avalanche release zones; 3 – avalanche danger zone calculated with RAMMS; 4 – profiles for calculating the avalanche run-out distance according to SP 428.1325800.2018; the numbers on the map indicate areas of interest

Таблица 2. Превышение дальности выброса лавин по профилю относительно ландшафтно-индикационного метода, м

Метод	Ключевой участок (см. рис. 4, в)		
	1	2	3
Графоаналитический ме- тод (СП 428.1325800.2018) при водозапасе 600 мм	+120	+1040	+1800
Математическое моделиро- вание в программе RAMMS с учетом трёхдневных снего- падов	0	+50	+300

толщины оторвавшегося снега на линии отрыва могут значительно превышать средние значения в зоне зарождения.

Отмечено, что полученные результаты в программе RAMMS напрямую зависят от входных параметров. Поэтому с учётом сложности рельефа, необходимо верифицировать результаты на основе данных фактических наблюдений, а при их отсутствии, соотносить полученные границы распространения лавин с выделенными участками растительности разного возраста. Это позволит убедиться в соответствии модельных выводов реальным условиям. Низкое давление лавин не уничтожает зрелый древостой (см. рис. 4, *a*, *б*), но может Лосев, 1987).

В графоаналитическом методе помимо заданных данных о высоте снежного покрова и водозапасе в нём ключевую роль при оценке дальности выброса лавин играет выделение лавинных очагов и проведение продольных профилей. Проведение этих профилей в соответствии с требованием их продольности, согласно СП 428.1325800.2018, позволяет корректно оценить максимальную дальность выброса, но затрудняет оценку боковых границ растекания лавины, так как в этом случае профили приходится проводить не по нормали к горизонталям.

Общим недостатком этих методик является недостаточное понимание поведения лавинных очагов в условиях сложного рельефа. Определение срабатывания зон зарождения по отдельным камерам или их совместного схода остаётся одним из открытых вопросов.

При анализе полученных результатов по дальности выброса лавин, оцененных разными методами (см. табл. 2; рис. 4, в), можно сделать вывод, что наиболее точно относительно эталонного (ландшафтно-индикационного) метода границы распространения лавин редкой обеспеченности воссоздаются с помощью математического моде-

повредить более молодой лес (рис. 5) (Божинский, лирования в RAMMS. Для трёх ключевых участков (см. рис. 4, в) границы практически совпадают или немного превышают уже существующий лавинный прочёс (ключевой участок № 3). По графоаналитическому методу максимальные расчётные дальности выброса лавин сильно превышают видимые в растительности границы. Важно отметить, что участки без лесной растительности вдоль тальвегов не всегда связаны со сходом лавин, а служат водотоками в крутых врезах (ключевой участок № 1). Однако определение характеристик точности результатов ни одна из методик не предусматривает, поэтому значимость их различий не определена.

выволы

Район Красной Поляны и рассмотренный в работе неосвоенный северный склон хребта Аибга характеризуются высокой лавинной активность с чётко выраженными косвенными фитоиндикационными признаками воздействия лавин в лесной зоне. На этой основе можно получить представление о границах распространения лавин и их дальности выброса разной повторяемости.

Результаты работы показали, что оценка достоверности результатов моделирования границ воздействия лавин в RAMMS и расчётов



Рис. 5. Повреждённые стволы молодого букового леса. Фото Д.А. Петракова, октябрь 2022 г. Fig. 5. Damaged trunks of young beech forest. Photo by D.A. Petrakov, October 2022

ЛЁД И СНЕГ 2025 том 65 **№** 1

дальности выброса на основе методики из СП 428.1325800.2018 может быть выполнена на основе ландшафтно-индикационного метода в результате анализа фитоинликационных признаков, чётко выраженных в растительности. Полученные выводы ожидаемо будут применимы для территорий со схожими рельефом, снежностью и растительностью, а также типом лавинного режима. Установлено, что в районе Красной Поляны результаты моделирования границ распространения лавин с периодом повторяемости 1 раз в 100 лет, смоделированные в RAMMS, соответствуют границам соответствующего возраста, выраженным в растительности и установленным на основе ландшафтно-индикационного метода. Это подтверждает достоверность полученных результатов моделирования в RAMMS с заданным периодом повторяемости. Зоны высокого (более 30 кПа) давления лавин, рассчитанного в RAMMS, хорошо соотносятся с полностью незалесёнными лавинными прочёсами, определёнными как по данным полевых исследований, так и в результате их дешифрирования по методике (Акифьева, 1980).

Результаты расчётов дальности выброса лавин, полученные на основании СП 428.1325800.2018 с учётом заданных исходных параметров, в большинстве крупных лавиносборов превышают нижние границы воздействия лавин, выраженные в растительности и установленные на основе ландшафтно-индикационного метода. Отсутствие рекомендаций по оценке боковых границ растекания лавин в зоне их остановки в условиях сложного рельефа Красной Поляны сильно усложняет определение нижних и боковых границ лавиносборов.

Сочетание разных подходов и методов определения дальности выброса лавин, взаимодополняющих друг друга, а также набор определённой статистики результатов расчёта и их соответствия друг другу позволит в будущем прийти к более достоверным её оценкам, а также не только качественным, но и количественным оценкам точности расчетных значений.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам Противолавинной службы горного курорта «Роза Хутор» за предоставленные материалы о высоте снежного покрова, позволившей провести необходимые расчёты. Исследование выполнено в рамках государственного задания МГУ имени М.В. Ломоносова 121051300175-4 «Опасность и риск природных процессов и явлений» (моделирование лавин) и 121051100164-0 «Эволюция криосферы при изменении климата и антропогенном воздействии» (выявление фитоиндикационных признаков лавинной деятельности).

Acknowledgements. The authors sincerely thank the experts from the Avalanche Prevention Service of the Rosa Khutor mountain resort for the data on the snow

cover height, which made it possible to carry out the necessary calculations. The study was conducted under the state assignment of Lomonosov Moscow State University 121051300175-4 "Danger and risk of natural processes and phenomena" (avalanche modeling) and 121051100164-0 "The cryosphere evolution under climate change and anthropogenic impact" (identification of phytoindication signs of avalanche activity).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Акифьева К.В. Методическое пособие по дешифрированию аэрофотоснимков при изучении лавин. Л.: Гидрометеоиздат, 1980. 49 с.
- Атлас снежно-ледовых ресурсов мира: Т. 2. Кн. 1 / Ред. В.М. Котляков. М.: Изд. Российской академии наук, 1997. С. 98–105.
- *Благовещенский В.П.* Определение лавинных нагрузок. Алма-Ата: Гылым, 1991. 115 с.
- Божинский А.Н., Лосев К.С. Основы лавиноведения. Л.: ГИМИЗ, 1987. 280 с.
- География лавин / Ред. С.М. Мягков, Л.А. Канаев. М.: Изд-во МГУ, 1992. 332 с.
- Заруднев В.М., Салпагаров А.Д., Ильичев Ю.Г., Хома И.И. Снежные лавины Западного Кавказа. Ставрополь: Изд-во «Орфей», 2004. 192 с.
- КАВКАЗ. РФ // Электронный ресурс. https://кавказ.рф Дата обращения: 26.09.2024.
- Казаков Н.А., Генсиоровский Ю.В., Казакова Е.Н. Лавинные процессы в бассейне реки Мзымты и проблемы противолавинной защиты Олимпийских объектов в Красной Поляне // ГеоРиск. 2012. № 2. С. 10–29.
- Казакова Е.Н., Боброва Д.А., Казаков Н.А. Проблемы недооценки лавинной опасности как причина лавинных катастроф // Четвертые Виноградовские чтения. Гидрология от познания к мировоззрению. 2020. С. 274–279.
- *Козик С.М.* Расчёт движения снежных лавин. Л.: ГИМИЗ, 1962. 76 с.
- Коровина Д.И., Турчанинова А.С., Сократов С.А. Оценка эффективности противолавинных мероприятий на горнолыжном курорте «Красная Поляна» // Лёд и Снег. 2021. Т. 61. № 3. С. 359–376.
- Научно-прикладной справочник «Климат России» 2000–2011–2024 ВНИИГМИ-МЦД.
- Олейников А.Д. Снежность зим в районе Красной Поляны (Западный Кавказ) // Вест. Московского ун-та. Сер. 5. География. 2010. № 2. С. 39–45.
- Олейников А.Д., Володичева Н.А. Зимы лавинного максимума на Большом Кавказе за период инструментальных наблюдений (1968–2016 гг.) // Лёд и Снег. 2020. Т. 60. № 4. С. 521–532.
- Погорелов А.В. Снежный покров Большого Кавказа. М.: ИКЦ «Академкнига», 2002. 287 с.

ЛЁДИСНЕГ том 65 №1 2025

- Расписание Погоды // Электронный ресурс. https://rp5.ru/ Bartelt P., Bühler Y., Christen M., Deubelbeiss Y., Salz M., Дата обращения: 01.10.2024.
- Родионова П.М., Турчанинова А.С., Сократов С.А., Селиверстов Ю.Г., Глазовская Т.Г. Методика учёта лавинной опасности при территориальном планировании в России // Лёд и Снег. 2019. Т. 59. № 2. C. 245-257.

https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-398

- СП 428.1325800.2018 «Инженерные изыскания для строительства в лавиноопасных районах. Общие требования». М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства РФ, 2019. IV + 58 c.
- Трошкина Е.С. Лавинный режим горных территорий СССР (Итоги науки и техники. Сер. Гляциология. Вып. 11) / Ред. К.С. Лосев. М.: ВИНИТИ, 1992. 184 c.
- Турчанинова А.С., Селиверстов Ю.Г., Глазовская Т.Г. Моделирование снежных лавин в программе RAMMS в России // ГеоРиск. 2015. № 4. С. 42-47.

- Schneider M., Schumacher L. RAMMS User Manual v 1.7.0 Avalanche. Davos: SLF. 2017. V. 97 c.
- Christen M., Bartelt P., Kowalski J. RAMMS: numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain // Cold Regions Science and Technology. 2010. V. 63. No. 1-2. P. 1-14.
- Lied K., Bakkehøi S. Empirical calculations of snow-avalanche run-out distance based on topographic parameters // Journal of Glaciology. 1980. T. 26. № 94. P. 165-177.
- Perla R., Cheng T.T., McClung D.M. A two-parameter model of snow-avalanche motion // Journal of Glaciology. 1980. V. 26. No. 94. P. 197-207.
- Salm B. Contribution to avalanche dynamics // Scientific aspects of snow and ice avalanches. Proc. of the Davos Symposium, Davos, Switzerland, 1965, P. 199–214.
- Voellmv A. Über die Zerstörungskraft von Lawinen // Schweizerische Bauzeitung. 1955. V. 73. No. 12. P. 159-165; No. 15. P. 212-217; No. 17. P. 246-249; No. 19. P. 280-285.

Citation: Zhukova E.D., Turchaninova A.S., Kovalenko N.V., Petrakov D.A. Assessment of avalanche runout distance at Krasnava Polyana in the absence of direct observational data. Led i Sneg. Ice and Snow. 2025, 65 (1): 69-80. [In Russian]. doi: 10.31857/S2076673425010057

Assessment of avalanche runout distance at Krasnaya Polyana in the absence of direct observational data

© 2025 E. D. Zhukova[#], A. S. Turchaninova, N. V. Kovalenko, D. A. Petrakov

Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia #e-mail: z,hukova.geo@mail.ru

Received October 12, 2024; revised December 3, 2024; accepted December 25, 2024

The purpose of this work was the effort to estimate the distance of snow avalanche runout on the undeveloped slope of the Aibga ridge in Krasnaya Polyana using the landscape-indicative method together with statistical analysis and numerical simulation. The approach to solving this problem is considered, combining: analysis of snow depth data and information about avalanches in the adjacent territory, identification of phyto-indicative evidences of the avalanche activity obtained during field observations and analysis of remote sensing data. The article describes in details each of the methods used, as well as contributions of them to the general methodology for estimating the runout range and the boundaries of areas of the avalanche distribution. The analysis of Earth remote sensing data, taking account of results of field surveys of key sites, was based on the landscape-indication method, which allowed us to determine the boundaries of areas of the impact of avalanches with different occurrences basing on observations of the vegetation changes. In addition, the distances of the avalanche runouts were calculated using graph-analytic method (SP 428.1325800.2018) and the RAMMS model. The results of the study show that several methods used in this work complement each other and provide more reasonable and accurate estimation of the avalanche range and the lateral boundaries of distribution of them. That is important for a territorial planning, making design decisions and choosing measures to ensure the safety of people and infrastructure objects if any recreational development of the territory is to be considered.

Keywords: snow avalanches, avalanche run-out distance, avalanche hazard, numerical modeling, RAMMS

REFERENCES

- Akif'eva K.V. Metodicheskoe posobie po deshifrirovaniyu aerofotosnimkov pri izuchenii lavin. Study guide on aerial photographs decommutation in avalanche research. Leningrad: GIMIZ, 1980: 49 p. [In Russian].
- Atlas snezhno-ledovykh resursov mira: V. 2. Book 1 / Ed. by V.M. Kotlyakov. Atlas of snow and ice resources of the world. Moscow: Russian Academy of Sciences, 1997: 98–105 [In Russian].
- Blagoveshchenskii V.P. Opredelenie lavinnykh nagruzok. Estimation of avalanches' loads. Alma-Ata: «Gylym», 1991: 115 p. [In Russian].
- Bozhinskiy A.N., Losev K.S. Osnovy lavinovedeniya. Fundamentals of avalanche science: Leningrad: GIMIZ, 1987: 280 p. [In Russian].
- *Geografiya lavin* / Ed. by S.M. Myagkov, L.A. Kanaev. Avalanche geography. Moscow: Moscow University Press, 1992: 332 p. [In Russian].
- Zarudnev V.M., Salpagarov A.D., Il'ichev Yu.G., Khoma I.I. Snezhnye laviny Zapadnogo Kavkaza. Snow avalanches of the Western Caucasus. Stavropol: Orfey, 2004: 192 p. [In Russian].
- *KAVKAZ.RF*. Retrieved from: https://кавказ.pф Last access: September 26, 2024.
- Kazakov N.A., Gensiorovsky Yu.V., Kazakova E.N. Avalanche processes in the Mzimta river basin and anti-avalanche protection problems of the olympic objects in Krasnaya Polyana. GeoRisk. GeoRisk. 2012, 2: 10–29 [In Russian].
- Kazakova E.N., Bobrova D.A., Kazakov N.A. Problems of underestimating avalanche hazards as a cause of avalanche catastrophes. Chetvertye Vinogradovskie chteniya. Gidrologiya ot poznaniya k mirovoszreniyu. 2020: 274–279 [In Russian].
- *Kozik S.M. Raschet dvizheniya snezhnykh lavin.* Calculation of snow avalanche movement. Leningrad: GIMIZ, 1962: 76 p. [In Russian].
- *Korovina D.I., Turchaninova A.S., Sokratov S.A.* Assessment of the effectiveness of avalanche mitigation measures at the Krasnaya Polyana ski resort. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2021, 61 (3): 359–376 [In Russian].
- Nauchno-prikladnoy spravochnik «Klimat Rossii» 2000-2011-2024 VNIIGMI-MTSD. Scientific and Applied Reference Book "Climate of Russia" 2000-2011-2024 VNIIGMI-MCD [In Russian].
- Oleynikov A.D. Snowiness of winters in the Krasnaya Polyana area (Western Caucasus). Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya. The Bulletin of Moscow University. Series 5. Geography. 2010: 2, 39–45 [In Russian].

- *Oleynikov A.D., Volodicheva N.A.* Winters of avalanche maximum on the Greater Caucasus during the period of instrumental observations (1968–2016). *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2020, 60 (4): 521–532 [In Russian].
- Pogorelov A.V. Snezhnoy pokrov Bol'shogo Kavkaza. Snow cover of the Greater Caucasus. Moscow: IKTs Akademkniga, 2002: 287 p. [In Russian].
- Raspisanie Pogody. Retrieved from: https://rp5.ru/ Last access: October 1, 2024.
- Rodionova P.M., Turchaninova A.S., Sokratov S.A., Seliverstov Yu.G., Glazovskaya T.G. Methodology for assessing avalanche hazards in territorial planning in Russia. *Led i Sneg.* Ice and Snow. 2019, 59 (2): 245–257. https://doi.org/10.15356/2076-6734-2019-2-398 [In Russian].
- SP 428.1325800.2018 "Inzhenernye izyskaniya dlya stroitel'stva v lavinoopasnyh rajonah. Obshchie trebovaniya". SP 428.1325800.2018 "Engineering survey for construction in snow avalanches-endangered regions. General requirements". Moscow: Ministry of Construction, Housing and Utilities of Russia, 2019, 4: 58 p. [In Russian].
- Troshkina E.S. Lavinnyi regim gornykh territorii SSSR (Itogi nauki i tekhniki; Ser. Glaciologiya 11). Avalanche regime of the mountain territories of the USSR (Outcomes of science and technology; ser. glaciology 11). Ed. K.S. Losev. Moscow: VINITI, 1992: 184 p. [In Russian].
- *Turchaninova A.S., Seliverstov Y.G., Glazovskaya T.G.* Modeling of snow avalanches using RAMMS in Russia. GeoRisk. 2015, 4: 42–47 [In Russian].
- Bartelt P., Bühler Y., Christen M., Deubelbeiss Y., Salz M., Schneider M., Schumacher L. RAMMS User Manual v 1.7.0 Avalanche. Davos: SLF. 2017, 5: 97 p.
- *Christen M., Bartelt P., Kowalski J.* RAMMS: numerical simulation of dense snow avalanches in three-dimensional terrain. Cold Regions Science and Technology. 2010, 63 (1–2): 1–14.
- *Lied K., Bakkehøi S.* Empirical calculations of snow–avalanche run–out distance based on topographic parameters. Journal of Glaciology. 1980, 26 (94): 165–177.
- Perla R., Cheng T.T., McClung D.M. A two-parameter model of snow-avalanche motion. Journal of Glaciology. 1980, 26 (94): 197–207.
- Salm B. Contribution to avalanche dynamics. Scientific aspects of snow and ice avalanches, Proceedings of the Davos Symposium. Davos, Switzerland, 1965: 199–214.
- *Voellmy A.* Über die Zerstörungskraft von Lawinen. Schweizerische Bauzeitung. 1955, 73 (12): 159–165, (15): 212–217, (17): 246–249, (19): 280–285.