ОПИСАНИЕ ПЕРЕНОСА И НАКОПЛЕНИЯ СНЕГА В МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ ПОВЕРХНОСТНОГО БАЛАНСА МАССЫ ГОРНОГО ЛЕДНИКА. ЧАСТЬ II. ПАРАМЕТРИЗАЦИЯ ЛАВИННОГО ПИТАНИЯ

О.О. Рыбак^{1, 2}, Е.А. Рыбак^{1, 2}, И.А. Корнева^{2, 3}

¹ Сочинский научно-исследовательский центр РАН, РФ, г. Сочи, ул. Театральная, 8а

² Филиал Института природно-технических систем, РФ, г. Сочи, Курортный просп., 99/18

E-mail: o.o.rybak@gmail.com, elena.rybak@gmail.com

³ Институт глобального климата и экологии им. Ю.А. Израэля, г. Москва, ул. Глебовская, 20Б

E-mail: comissa@mail.ru

В зависимости от конфигурации окружающего рельефа лавинное питание может играть существенную роль в динамике горного ледника. Лавины также являются причиной перемещения массы снега и внутри границ ледника. В этом случае перемещения массы из-за границ ледника не происходит, однако меняются физические свойства поверхности и толщина снежного покрова на отдельных участках ледника, что оказывает воздействие на формирование поверхностного баланса массы ледника, и следовательно, в определенной степени меняет его динамический режим. Для формализации лавинного питания и перераспределения массы лавинами в математической модели поверхностного баланса массы предложено использовать простейшую модель клеточного автомата. В численных экспериментах со схематически заданным рельефом поверхности показана эффективность предложенного алгоритма.

Ключевые слова: горный ледник, аккумуляция, снежный покров, лавина, лавинное питание, математическая модель, поверхностный баланс массы, клеточный автомат.

Поступила в редакцию: 05.08.2019. После доработки: 19.11.2019.

Введение. Приходная часть поверхностного баланса массы горного ледника (аккумуляция) не сводится к выпадению твердых осадков. В зависимости от особенностей окружающего рельефа значительный вклад в поступление массы снега на поверхность ледника могут вносить лавины. Прежде всего, это относится к ледникам, расположенным на отрицательных формах рельефа (каровым, долинным и т.п. [1]), более того, именно лавинное питание обеспечивает устойчивость каровых ледников [2]. Так, Лурье и др. [3] оценивают вклад лавинного питания в общий суммарный приход массы ледников Северного склона Большого Кавказа в 3–76%. Поскольку авторы не раскрывают на основании чего, собственно, была сделана соответствующая оценка, есть достаточные основания усомниться в ее достоверности. К примеру, В.В. Поповнин и Т.В. Пылаева оценивают вклад лавинного питания в зимний баланс массы ледника

Джанкуат в 2,8%, правда, только для единственного гидрологического года 1998/1999 [4]. По мнению авторов, в этом году преобладали «средние» условия аккумуляции. Максимальный же вклад лавинного питания оценивается в 10%, минимальный в 1,8%, среднее же за 15 сезонов, рассчитанное по методике [4], составляет 4,7% [1]. В отличие от Джанкуата, другой ледник на северном склоне Большого Кавказа, Колка, известный по катастрофе 2002 г., является типичным ледником лавинно-обвального питания. Здесь объем снега и льда, поступающего в результате лавин и обвалов, более чем в пять раз превышает долю твердых осадков, выпадающих на поверхность ледника [5]. Еще одним типичным ледником ледникового питания является Уллукам, один из окраинных ледников Эльбруса, который в силу разных причин потерял связь с ледовыми склонами Эльбруса [6]. Приведенные примеры иллюстрируют достаточ-

но широкий разброс оценок даже в пределах относительно небольшого региона. Ключевой фактор, определяющий степень значимости лавинного питания для ледникового объекта – это морфология ледника и окружающих склонов [1]. Для настоящей работы большое значение имеет и сформулированное в работе [1] предположение, что порядок вклада лавин в общую аккумуляцию ледника ориентировочно пропорционален площади лавиносборов окружающих склонов, тогда как конкретные значения доли лавинного питания будут определяться сезонными показателями снежности зимы и фоновой аккумуляции.

Прогноз лавин, безусловно, имеет важное значение, прежде всего, с точки зрения различных аспектов жизнедеятельности в горных районах – от бесперебойного функционирования транспортных магистралей до обеспечения безопасности на горнолыжных курортах. В настоящей работе, однако, лавинообразование рассмотрено в упрощенном виде для включения процесса смещения масс снега под действием силы тяжести в математическую модель поверхностного баланса массы горного ледника. Есть одно существенное замечание, относящееся к понятию лавинного питания ледника. Категория лавинного питания охватывает не все снеголавинные процессы на леднике, а только те объемы снега, которые привнесены на поверхность ледника лавинами, сходящими из-за его пределов [1]. Тем не менее, лавины играют большую роль в перераспределении снега в пределах ледника. Хотя вертикальное перераспределение массы и не меняет приходную часть баланса массы, однако может влиять на другие характеристики, определяющие условия таяния. Например, вертикальное перераспределение снега внутри одного ледникового комплекса критически важно для расчета баланса массы, скажем, ледников Эльбруса, который можно рассматривать как яркий пример положительной формы рельефа.

В целом в настоящее время используются два подхода к прогнозированию

снежных лавин – статистический и физико-математический [7]. Ко второму подходу можно отнести использование модели клеточных автоматов [8–10]. В несколько упрощенном виде этот метод используется в настоящем исследовании. Цель исследования состояла в адаптации уже существующих разработок для моделирования приходной части поверхностного баланса массы горного ледника, а не в прогнозировании лавин или оценивании степени лавинной опасности. По этой причине описываемый ниже алгоритм в известной степени схематичен и не учитывает ряд важных характеристик, таких как физические свойства снега, его структура, а также изменение этих свойств во времени.

Описание расчетного алгоритма.

Для имитации процесса вертикального перераспределения массы снега нами использована идея клеточных автоматов. Клеточные автоматы представляют собой дискретные динамические системы, поведение которых полностью может быть описано в терминах локальных взаимодействий. На каждом временном шаге для каждой «клетки» рассчитывается новое состояние как функция состояний окружающих ее клеток [11]. Формальное математическое описание клеточных автоматов в контексте их приложения к прогнозу схода снежных лавин можно найти в многочисленных работах, в том числе и в процитированных выше [8–11]. В связи с этим мы считаем целесообразным сделать отсылку на эти работы и ограничиться лишь описанием примененного в настоящем исследовании алгоритма расчетов.

В интересующих нас приложениях производится разбиение области на гексагональные [8–10] или прямоугольные элементы [11]. Для простоты описания нами использовано последнее (рис. 1). Ключевыми величинами, определяющими сход лавины, является крутизна склонов и физические свойства снега. Поскольку последние в упрощенном описании игнорируются, остается только крутизна склона. В ряде работ (например, [12]) декларируется, что диапазон уклонов, благоприят-

ных к сходу лавин находится в пределах 25° – 55° . Однако, этот диапазон зачастую приводится без ссылки на первоначальный источник [13] и в связи с этим трактуется не вполне корректно. На самом деле речь идет о критическом уклоне, при котором сходы лавин могут быть спровоцированы людьми (имеются в виду горнолыжники). При этом количество лавин, сошедших со склонов с уклоном менее 32° исчезающе мало (рис. 1 в [13]).

Уклон в каждом узле сетки используется в качестве единственного параметра состояния «клетки». В соответствии с принятым разбиением [14] – так называемой окрестностью Мура 1-го порядка (рис. 1) на каждом расчетном шаге производится вычисление градиента поверхности в центральной ячейке по восьми направлениям $k=1, \dots, 8$. Считается, что сход лавины происходит в направлении с максимальным уклоном $k_{\max}$, если уклон превышает критический.

-1,1 8	0,1 1	1,1 2
-1,0 7	0,0 0	1,0 3
-1,-1 6	0,-1 5	1,-1 4

Рис. 1. Пример разбиения области на ячейки – «окрестность Мура». Черным цветом обозначены координаты клеток, окружающих центральную (выделена серым цветом). Красным цветом обозначены номера ячеек-соседей в порядке обхода при расчете градиента поверхности по каждому из восьми направлений

Fig. 1. An example of the splitting the model domain into cells – «Moore neighborhood». The coordinates of the cells surrounding the central one (indicated in grey) are marked by black. Cells-neighbors are numbered clock-wise (indicated in red) for calculation of surface gradients for each of the eight directions

Последний может быть фиксированным или зависеть от уклона поверхности. Поскольку плотность снега считается пространственно-однородной величиной, то для всех ячеек массу потенциального вертикального перемещения снега в направлении $k_{\max}$ можно считать пропорциональной толщине слоя снега Δh . На величину последнего накладывается условие: минимальная толщина снега в центральной ячейке после схода лавины не может быть ниже заданной величины $h_{\min}$. Поле потенциально-доступного количества снега, то есть того количества, которое может быть перенесено из соседней ячейки (или ячеек) для каждой ячейки, рассчитывается независимо от остальных. Ячейку, из которой происходит перемещение снега назовем «ячейкой-донором», а ячейку, в которую переносится снег – «ячейкой-акцептором». На каждом временном шаге вычисляется только одно перемещение потенциально-доступного количества снега из ячейки-донора, однако для ячейки-акцептора количество доноров не ограничено. В предельном случае, если ячейка расположена в локальной депрессии, в нее может поступить снег из всех окружающих ячеек. Очевидно, что по условиям эксперимента, одна и та же ячейка на каждом временном шаге может выступать как донором, так и акцептором. Для того, чтобы избежать ситуации, когда перемещенный вниз по склону слой снега в ячейке-доноре на текущем временном шаге не переместился далее из-за увеличения уклона или толщины сверх критических значений, все перемещения обуславливаются теми значениями критических величин, которые сложились до момента самого перемещения. Иначе говоря, на каждом временном шаге снег может сместиться только на одну соседнюю ячейку.

Постановка численных экспериментов. Цель проведения численных экспериментов заключалась в изучении влияния вертикального перераспределения массы снега на формирование поля толщины снежного покрова. Рельеф задавался схематически (рис. 2). Поле ветра, его пере-

счет в поле переноса массы снега в приземном слое, кривизна подстилающей поверхности и фактор увеличения (уменьшения) скорости ветра в приземном слое под влиянием рельефа (36) заданы в соответствии с формулами из [15, 16], применение которых подробно рассмотрено в части 1 настоящей статьи [17]. Было проведено пять численных экспериментов (табл. 1). В контрольном эксперименте Э1 гравитационное (вертикальное) перераспределение не предусматривалось. Исходя из довольно широкого диапазона оценок значений критического уклона, нами было рассмотрено два случая:

1. Критическим считается уклон 30° , и это значение постоянно. Элемент рельефа, на котором проверяется работоспособность алгоритма имеет максимальный уклон, несколько превышающий критический (рис. 3а).

2. Критический уклон рассчитывается исходя из толщины слоя снега в соответствии с оценками [18] (рис. 4). Очевидно, что при нулевом уклоне критическая толщина бесконечна.

В экспериментах Э2-Э5 применялись различные критерии «обрушения», то есть перемещения слоя снега из ячейки-донора в ячейку-акцептор. Превышение уклона поверхности над фиксированной критической величиной ($\varphi \geq 30^\circ$) служило критерием в Э2 и Э4. Превышение критической толщины снежного покрова h_{crit} в ячейке-доноре, которая зависит от уклона поверхности, – в Э3 и Э5. В Э2 и Э3 из процесса перераспределения исключен перенос снега ветром. В Э4 и Э5 перенос ветром включен, при этом на каждый временной шаг длительностью 30 мин приходится один цикл расчета перемещения снега из ячейки-донора в соседнюю ячейку-акцептор.

Приток массы на поверхности (твердые осадки) не рассматривался. Во всех численных экспериментах была принята начальная толщина снежного покрова $h=6$ м, равномерно распределенного по всей области. Эта величина соответствует критическому уклону около 23° (см. рис. 4). Длительность численных экспериментов составила 48 модельных часов.

Рис. 2. Схематическое представление элемента рельефа (высота, м)

Fig. 2. Schematic representation of the terrain elements (altitude, m)

Рис. 3. Уклон поверхности (град.) схематической формы рельефа (а). Фактор увеличения (уменьшения) скорости ветра (б); белым цветом выделены изолинии высоты. Боковая оцифровка (здесь и на последующих рисунках) – расстояние в метрах

Fig. 3. The surface slope (deg.) of the schematic terrain feature (a). Scaling factor of increasing (decreasing) of wind speed (b); the isolines of elevation are indicated in white. Side numbers (here and in the following figures) indicate distance in meters

Результаты и обсуждение. В контрольном эксперименте Э1 снег перераспределялся исключительно вследствие ветрового переноса (в отличие от последующих Э2-Э5). Очевидно, что к концу эксперимента максимальное накопление снега наблюдается с подветренной стороны вершины (рис. 5 а, б), а максимальное уменьшение (до нуля) – на наветренной стороне. Подобная картина вполне объяснима, поскольку механизм вертикального

Рис. 4. Зависимость критической толщины слоя снега от уклона поверхности [18]

Fig. 4. Dependence of the critical snow depth on the surface slope [18]

Таблица 1. Характеристика численных экспериментов

Наименование эксперимента	Условие обрушения	Ветровой перенос
Э1	-	+
Э2	$\varphi \geq 30^\circ$	-
Э3	$h \geq h_{crit}(\varphi)$	-
Э4	$\varphi \geq 30^\circ$	+
Э5	$h \geq h_{crit}(\varphi)$	+

перераспределения в контрольном эксперименте отсутствует. У подножья горы формируются фрагментарные области накопления снега, несколько выше которых расположены две узкие непрерывные области (с наветренной и с подветренной стороны), где снежный покров отсутствует полностью (выделены зеленым на рис. 5 б).

В Э2 и Э3 вертикальное смещение вниз по склону в отсутствие ветрового переноса приводит к тому, что снег, перемещаясь к подножию «горы», накапливается у ее подножья. Длительности эксперимента было достаточно для того, чтобы в эксперименте Э2 в области, где уклон превышает критический, установилась

минимальная толщина снежного покрова $h_{\min}=1$ м (рис. 6 а). Э2 представляет своего рода предельный случай, когда вертикальное перераспределение снега жестко ограничивается крутизной склона, а иной механизм перераспределения (ветровой перенос) отсутствует.

Рис. 5. Толщина снега в конце контрольного численного эксперимента Э1 (а) и разность между конечной и начальной толщиной (б), м.

Зеленым цветом (здесь и на последующих рисунках) выделены области с нулевой толщиной снежного покрова

Fig. 5. Snow depth at the end of the control experiment E1 (a) and the difference between the initial and final depths (b), m. Areas with zero snow depth are indicated in green (here and in the following figures)

Следствием накопления снега является то, что в Э2 и Э4 у подножья горы происходит увеличение уклона выше критического, а в Э3 и Э5 – увеличение толщины сверх критической и во всех эксперимен-

тах снег начинает распространяться за пределы горы (чего не происходит в контрольном эксперименте). В экспериментах Э3 и Э5 этот процесс происходит более интенсивно и область распространения больше (рис. 6 в, г). Собственно, это ожидаемый результат, который является следствием зависимости критического уклона от толщины слоя снега.

В отсутствие ветрового переноса снежный покров выше 950 м остается практически нетронутым (рис. 6 а, б). Форма области нетронутого снежного покрова на рис. 6 а представляет собой неправильный восьмиугольник (рис. 6 а) со сторонами, ориентированными по восьми направлениям перемещения снега. Форма аналогичной области в случае действия альтернативного критерия обрушения (см. выше) представляет собой эллипс, параллельный изолиниям высоты.

Ветровой перенос определяет толщину снежного покрова у вершины (рис. 7) – на наветренном склоне толщина слоя снега уменьшается на 1 м и более, чем ближе к вершине, тем слой снега тоньше, а в нескольких ячейках у самой вершины (выделенных зеленым цветом) снежный покров отсутствует. При этом подобная картина наблюдается как в контрольном Э1, так и в Э4 и Э5. На подветренном склоне картина обратная, где первоначальная толщина может вырасти практически вдвое. Собственно, такое распределение соответствует известным из наблюдений закономерностям [16, 19].

Заметим, что небольшое увеличение толщины имеет место справа и слева от вершины в области незначительной конвергенции потоков. Однако в Э4 и Э5 этот рост ограничен областью, где не работает вертикальный перенос (рис. 7 б, в).

Асимметрия в распределении снега на наветренных и подветренных участках наиболее заметна в контрольном эксперименте. Этот эффект естественным образом сглаживается в процессе вертикального смещения, и в Э4 и Э5 асимметрия выражена крайне слабо (рис. 6 в, г), за исключением области вокруг вершины (рис.

7 б, в). Отметим, что в последнем случае (рис. 7 в) снег распространяется подобно волнам, что обусловлено зависимостью угла наклона от толщины слоя снега.

Заключительные замечания. В настоящей работе обсуждаются результаты расчетов изменения распределения толщины снежного покрова под действием ветрового переноса и вертикального (гравитационного) смещения, которое в очень упрощенной форме имитирует лавинное питание горного ледника. За основу расчетной схемы взят клеточный автомат. Поскольку реализованный алгоритм предназначен не для оперативных прогнозов снежных лавин, а для целей более реалистичных расчетов поверхностного баланса

массы ледников в прогностических математических моделях, фактор времени не играет большой роли. Из расчетной схемы исключены вариации физических свойств снега, и единственной характеристикой снежного покрова является его толщина. Разумеется, установленные закономерности относятся к очень схематизированному случаю, однако нами было показано, что с помощью простых методов возможно отразить основные закономерности перераспределения снега после его выпадения на поверхность земли в условиях горного рельефа. Следующим шагом в настоящем исследовании будет применение разработанных алгоритмов в реальных природно-климатических условиях.

Рис. 6. Разница между конечной и начальной толщиной снега, м, в численных экспериментах Э2 (а), Э3 (б), Э4 (в) и Э5(г)
Fig. 6. Difference between the final and the initial snow depths, m, in numerical experiments E2 (a), E3 (b), E4 (c), E5 (d)

Рис. 7. Разница между конечной и начальной толщиной снега, м, в окрестностях вершины в численных экспериментах Э1 (а), Э4 (б) и Э5 (в). Цветовая шкала как на рис. 6

Fig. 7. Difference between the final and the initial snow depths, m, in the vicinity of summit in numerical experiments E1 (a), E4 (b) and E5 (c). The color scale as in fig. 6

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Поповнин В.В., Сергеевская Я.Е. Об обратной связи доли лавинного питания с аккумуляцией ледника // Лед и Снег. 2018. Т. 58. № 4. С. 437–447. doi: 10.15356/2076-6734-2018-4-437-447
2. Реакция ледников Центрального Кавказа в 2001-2010 гг. на изменения температуры и количества осадков / Г.А. Носенко, Т.Е. Хромова, О.В. Рототаева [и др.] // Лед и Снег. 2013. Т. 53. № 1. С. 26–33. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2013-1-26-33>
3. Панов В.Д., Лурье П.М., Ильичев Ю.Г. Состояние современного оледенения северного склона Большого Кавказа на начало XXI столетия // Устойчивое развитие горных территорий. 2010. Т. 2. № 3. С. 69–73.
4. Поповнин В.В., Пылаева Т.В. Лавинное питание ледника Джанкуат // Лед и Снег. 2015. Т. 55. № 2. С. 21–32. doi:10.15356/2076-6734-2015-2-21-32
5. Носенко Г.А., Рототаева О.В., Никитин С.А. Особенности изменений ледника Колка с 2002 по 2016 гг. // Лед и Снег. 2017. Т. 57. № 4. С. 468–482. doi: 10.15356/2076-6734-2017-4-468-482
6. К голоценовой истории ледника Уллукам / О.Н. Соломина, И.С. Бушуева, Т.М. Кудерина [и др.] // Лед и Снег. 2012. Т. 52. № 1. С. 85–94. <https://doi.org/10.15356/2076-6734-2012-1-85-94>
7. Schweizer J., Jamieson J.B., Schneebeli M. Snow avalanche formation // Reviews of Geophysics. 2003. Vol. 41 (4). 1016. doi:10.1029/2002RG000123
8. Avolio M.V., Errera A., Lupiano V. et al. VALANCA: A Cellular Automata Model for Simulating Snow, Avalanches // Journal of Cellular Automata. 2012. Vol. 12. P. 309–332.
9. Kronholm K., Birkenland K.W. Integrating spatial patterns into a snow avalanche cellular automata model // Geophysical Research Letters. 2005. Vol. 32. L19504. doi:10.1029/2005GL024373
10. Bernhardt M., Schulz K. SnowSlide: A simple routine for calculating gravitational snow transport // Geophysical Research Letters. 2010. Vol. 37. L11502. doi:10.1029/2010GL043086
11. Fonseca P., Colls M., Casanovas J. A novel model to predict a slab avalanche configuration using $m:n$ -CA^k cellular automata // Computers, Environment and Urban Sys-

tems. 2011. Vol. 35. P. 12–24. doi:10.1016/j.compenvurbsys.2010.07.002.

12. Соловьев А.С., Калач А.В. Некоторые аспекты прогнозирования схода снежных лавин // Технологии техносферной безопасности. Интернет-журнал. 2011. Вып. 1 (35). С. 1-5 [Электронный ресурс]. URL: <http://agps-2006.narod.ru/ttb/2011-1/11-01-11.ttb.pdf> (дата обращения: 23.06.2019).

13. Schweizer J., Jamieson J.B. Snow cover properties for skier triggering of avalanches // Cold Regions Science and Technology. 2001. Vol. 33. P. 207–221.

14. D'Ambrosio D., Di Gregorio S., Iovine G. et al. Simulating the Curti-Sarno debris flow through cellular automata: the model SCIDICA (release S₂) // Physics and Chemistry of the Earth. 2002. Vol. 27. P. 1577–1585.

15. Ohara N. A practical formulation of snow surface diffusion by wind for watershed-scale applications // Water Resources Research. 2014. Vol. 50. P. 5074–5089.

doi:10.1002/2013WR014744.

16. Liston G.E., Haehnel R.B., Sturm M. et al. Simulating complex snow distributions in windy environments using SnowTran-3D // Journal of Glaciology. 2007. Vol. 53 (181). P. 241–256.

17. Рыбак О.О., Рыбак Е.А., Корнева И.А. Описание переноса и накопления снега в математической модели поверхностного баланса массы горного ледника. Часть I. Теория, базовые алгоритмы и тестирование // Системы контроля окружающей среды. 2019. Вып. 3 (37). С. 70–78. DOI: 10.33075/2220-5861-2019-3-70-78

18. Bernhardt M., Schulz K. SnowSlide: A simple routine for calculating gravitational snow transport // Geophysical Research Letters. 2010. Vol. 37. L11502. doi:10.1029/2010GL043086

19. Liston G.E., Sturm M. A snow-transport model for complex terrain // Journal of Glaciology. 1998. Vol. 44, No. 148. P. 499–516.

DESCRIPTION OF SNOW TRANSPORT AND ACCUMULATION IN MATHEMATICAL MODEL OF SURFACE MASS BALANCE OF MOUNTAIN GLACIER. PART II. PARAMETERIZATION OF AVALANCHE FEEDING

O.O. Rybak^{1,2}, E.A. Rybak^{1,2}, I.A. Korneva^{2,3}

¹ Sochi Research Center of RAS,

RF, Sochi, Theatralnaya St., 8a

² Branch of Institute of Natural and Technical Systems,

RF, Sochi, Kurortny Av., 99/18

³ Yu.A. Israel Institute of Global Climate and Ecology,

RF, Moscow, Glebovskaya St., 20B

Depending on surrounding relief configuration, avalanche feeding may play a significant role in mountain glaciers dynamics. Besides, avalanches cause transportation of mass inside the boundaries of a glacier. In this case, there is no inflow of mass from outside. However, physical properties of glacial surface as well as local snow cover thickness can change affecting surface mass balance of the glacier and, thus, changing to some extent its dynamic regime. In order to formally describe avalanche feeding and mass redistribution by avalanches, we suggest a simple model of the cellular automaton. Efficiency of the suggested algorithm was proved by numerical experiments with a schematic relief.

Keywords: mountain glacier, accumulation, snow cover, avalanche, avalanche feeding, mathematical model, surface mass balance, cellular automaton