

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
КАРАЧАЕВО-ЧЕРКЕССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ имени У.Д. АЛИЕВА**

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
КАРАЧАЕВО-ЧЕРКЕССКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**МИНИСТЕРСТВО ТУРИЗМА И МОЛОДЕЖНОЙ ПОЛИТИКИ  
КАРАЧАЕВО-ЧЕРКЕССКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

**АКТУАЛЬНЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ  
СБАЛАНСИРОВАННОГО РАЗВИТИЯ ГОРНЫХ  
ТЕРРИТОРИЙ В КОНТЕКСТЕ  
МЕЖДИСЦИПЛИНАРНОГО ПОДХОДА**

**Материалы I Международной научной конференции  
Карачаевск, 27-29 сентября 2019 г.**



**Карачаевск, 2019**

УДК 338.48+502/504.06+550.34/559.9+911  
ББК 26

Печатается по решению редакционно-издательского  
совета Карачаево-Черкесского государственного  
университета имени У.Д. Алиева

**Актуальные направления сбалансированного развития горных территорий в контексте междисциплинарного подхода:** материалы I Международной научной конференции. – Карачаевск: КЧГУ, 2019. - 295 с.

**ISBN 978-5-8307-0594-3**

В сборнике представлены доклады I Международной научной конференции «Актуальные направления сбалансированного развития горных территорий в контексте междисциплинарного подхода», которая состоялась 27-29 сентября 2019 г. на базе Карачаево-Черкесского государственного университета имени У.Д. Алиева (г. Карачаевск). В представленных работах рассматриваются вопросы, связанные с поддержанием механизмов устойчивости экосистем горных территорий, подвергающихся интенсивному техногенному воздействию, а также социально-экономические и историко-культурные аспекты жизни горных этносов.

Авторы опубликованных статей несут ответственность за достоверность и точность фактов, цитат, экономико-статистических данных, собственных имен, географических названий и прочих сведений.

**Редакционная коллегия:**

Кипкеева П.А. (ответственный редактор),  
Потапенко Ю.Я.,  
Онищенко В.В.,  
Демина О.Н.,  
Семенова Ф.О.,  
Эдиев А.У.

**ISBN 978-5-8307-0594-3**

© Карачаево-Черкесский государственный  
университет имени У.Д. Алиева, 2019

3. Закруткин В.Е., Складенко Г.Ю., Бакаева Е.Н., Решетняк О.С., Гибков Е.В., Фоменко Н.Е. Поверхностные и подземные воды в пределах техногенно нарушенных геосистем Восточного Донбасса: формирование химического состава и оценка качества. - Ростов-н/Д: ЮФУ, 2016. - 170 с.
4. Зубков Е.А. Грунтовые воды юга Ростовской области и их влияние на подтопление территорий населенных пунктов // автореферат дис. ... кандидата географических наук / Юж. федер. ун-т. – Ростов н/Д, 2016. - 22 с.
5. Складенко Г.Ю., Закруткин В.Е., Зубов А.Р., Зубова Л.Г., Решетняк О.С. Влияние угледобычи в Донбассе на подземные и поверхностные воды // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Естественные науки. 2017. - № 3-1 (195-1). - С. 100-107.
6. Zakrutkin V.E., Shishkina D.Yu., Gibkov E.V., Sklyarenko G.Yu. Landfills of municipal solid wasters as a sources of impact on the environment (ecology-geochemical aspect) // International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM. 2018. - Т. 18.- № 5-2. - С. 553-561.
7. Экологический атлас Ростовской области / Под ред. В.Е. Закруткина. – Ростов н/Д: Изд-во СКНЦ ВШ, 2000. – 120 с.

УДК 551.321.86

**ОПИСАНИЕ СНЕГОНАКОПЛЕНИЯ В МОДЕЛИ  
ПОВЕРХНОСТНОГО БАЛАНСА МАССЫ ГОРНОГО ЛЕДНИКА**  
**DESCRIPTION OF SNOW ACCUMULATION IN A SURFACE MASS  
BALANCE MODEL OF A MOUNTAIN GLACIER**

*Рыбак О.О.<sup>1,2</sup>, Рыбак Е.А.<sup>1,2</sup>*

*o.o.rybak@gmail.com, elena.rybak@gmail.com*

<sup>1</sup>*ФГБУН Сочинский научно-исследовательский центр РАН, Сочи, Россия*

<sup>2</sup>*Филиал ФГБНУ «Институт природно-технических систем», Сочи, Россия*

*Rybak O.O.<sup>1,2</sup>, Rybak E.A.<sup>1,2</sup>*

<sup>1</sup>*Sochi Research Center of RAS, Sochi, Russia*

<sup>2</sup>*Branch of Institute of Natural and Technical Systems, Sochi, Russia*

**Аннотация.** В статье рассмотрен расчетный алгоритм для описания переноса и накопления снега для последующего включения в модель поверхностного баланса массы горного ледника. Алгоритм основан на решении уравнения адвекции-диффузии с полумпирическим описанием скорости переноса. Алгоритм протестирован для схематически представленного элемента рельефа поверхности.

**Ключевые слова:** горный ледник, аккумуляция, снежный покров, метелевый перенос, математическая модель

**Abstract.** In this paper, we consider a computational algorithm for description of transportation and accumulation of snow for further incorporation to a mass balance model of a mountain glacier. This algorithm is based on solution of the advection-diffusion equation with semi-empirical description of transportation velocity. The algorithm is tested for a schematically represented element of terrain.

**Key words:** mountain glacier, accumulation, snow cover, snow storm transportation, mathematical model

**Введение.** Ключевой проблемой в описании эволюции горного ледника в математической модели является аккуратная формализация баланса массы на его поверхности. Если расходная часть – абляция – может быть адекватно рассчитана, опираясь на хорошо известные обстоятельства или понятно формализуемые потоки, то расчет приходной части – аккумуляции – несет массу неопределенностей. Так, пространственная изменчивость зимнего баланса массы на порядок превышает ошибку при расчете таяния в сезон абляции [1]. Снегонакопление на поверхности ледника зависит от многочисленных факторов, при этом их соотношение меняется от одного ледника к другому. Наряду с атмосферными осадками в приходной части баланса массы большую роль играет метелевый перенос и лавинное питание. По оценке [2], на северном склоне Большого Кавказа осадки составляют более половины в приходной

части баланса массы, а метелевый перенос – от 10 до 42%. Распределение твердых осадков над ледником может значительно отличаться от суммы осадков на близлежащих метеорологических станциях. Проблема формализации, по-видимому, не может быть решена средствами реанализа, так как расхождение в модельных и измеренных данных может достигать 50% [3]. Собственно говоря, даже измерение суммы осадков непосредственно на леднике не гарантирует от ошибки. Систематический недоучет твердых осадков при измерении осадкомером конструкции Третьякова составляет 30–60%, а дождемером – более 50% (см. соответствующие ссылки в работе [4]). Тот факт, что аккумуляция не сводится к сумме выпадающих твердых осадков, становится очевидным, если сопоставить измеренные суммы осадков на метеостанциях и количество сезонного снега в шурфах. Например, годовое количество осадков на метеостанциях Терскол и Местиа составляет около 1000 мм, в то же время годовая аккумуляция на леднике Джанкуат, который расположен приблизительно на одинаковом расстоянии от обеих метеостанций, достигает 2800–2900 мм/год [5]. Аналогичная картина наблюдается на поверхности ледникового массива Эльбруса, который находится приблизительно в 20 км от метеостанции Терскол. На относительно пологом Западном плато средняя аккумуляция в 1924–2009 гг., рассчитанная на основе интерпретации данных бурения, составила 1455 мм/год [6], то есть практически в полтора раза больше, чем средняя годовая сумма осадков на станции Терскол.

Физические механизмы перераспределения снега в процессе выпадения осадков изучены достаточно хорошо и детально. В целом их можно формально свести к переносу материала в двухфазной жидкости. Разумеется, этот процесс (точнее, набор процессов, включая сублимацию частиц снега) достаточно сложен. Существует немало математических моделей, описывающих процессы метелевого переноса, однако, практически все они в той или иной степени опираются на теоретические положения, наиболее полно сформулированные в фундаментальной работе Дюнина [7].

В настоящей работе рассмотрены некоторые аспекты упрощенного подхода к расчету пространственного перераспределения снега для включения в модель поверхностного баланса массы горного ледника, в рамках которого реализована схематическая имитация механизмов дефляции, переноса и аккумуляции снега в пределах ограниченной области. В статье использованы, главным образом, идеи, сформулированные в работе [8].

**Постановка задачи.** Если пренебречь теплообменом поверхностного слоя снега/фирна/льда с нижележащими слоями ледника, то процессы, формирующие баланс массы на поверхности, вполне можно рассматривать для бесконечно тонкого слоя (скин-слоя). В этом случае толщина снега будет только характеристикой поверхности, обладающей определенным набором свойств (значением альбедо, влагопоглощающей способностью и т.д.). Перераспределение снега можно описать уравнением [8]:

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{1}{\rho_{sm}} \left[ \frac{\partial Q_x}{\partial x} + \frac{\partial Q_y}{\partial y} + S \right], \quad (1)$$

где  $\eta$  – толщина подвижного слоя льда,  $\rho_{sm}$  – плотность подвижного снега,  $Q_x$  и  $Q_y$  – горизонтальные потоки снега по направлениям  $x$  и  $y$  соответственно,  $S$  – сумма всех локальных источников/стоков (твердые осадки, таяние, сублимация). В соответствии с [8] потоки  $Q_x$  и  $Q_y$  состоят из трех компонент  $F$ ,  $D$  и  $G$ :

$$\begin{aligned} Q_x &= F_x(u^*, snow, x) + D_x(\epsilon \{u^*\} snow, x) \frac{\partial h}{\partial x} + G_x\left(snow, \frac{\partial h}{\partial x}\right) \\ Q_y &= F_y(v^*, snow, y) + D_y(\epsilon \{v^*\} snow, y) \frac{\partial h}{\partial y} + G_y\left(snow, \frac{\partial h}{\partial y}\right), \end{aligned} \quad (2)$$

где  $F_x$  и  $F_y$  – проекции на оси  $x$  и  $y$  скорости переноса снега. В качестве полуэмпирического уравнения для  $F_x$  и  $F_y$  нами использовано уравнение, предложенное в работе [9]:

$$\left| \vec{F} \right| = 0,000077(w_{10} - 5)^3, \quad (3)$$

где  $w_{10}$  – скорость ветра на высоте 10 м над поверхностью земли. Очевидно, что базовая идея [8] заключается в полуэмпирическом подходе к расчету переноса, что существенно упрощает реальную картину и позволяет избежать описания ряда трудноформализуемых процессов дефляции, сальтации и др.

Вторые члены в правой части уравнений (2) описывают горизонтальную диффузию и зависят от турбулентных компонент скорости ветра и состояния снежного покрова, описываемого функцией  $snw$ , а  $h=\eta+s$  – высота заснеженной поверхности,  $s$  – высота «неподвижной» поверхности снега или поверхности земли. Третьи члены,  $G_x$  и  $G_y$ , описывают смещение снега за счет гравитации (в настоящей работе не рассматриваются). Поскольку нас интересует только перераспределение снега в поле ветра, осадки, сублимация и гравитационное смещение не рассматриваются, коэффициент диффузии не зависит от координат и постоянен. Таким образом, подстановка (2) в (1) дает

$$\frac{\partial \eta}{\partial t} = \frac{1}{\rho_{sm}} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( F_x + D_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( F_y + D_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right]. \quad (4)$$

Уравнение (4) решается численно методом переменных направлений.

**Схематическое задание рельефа и поля ветра.** В настоящей работе исследуется схематический случай перераспределения снега в квадратной области размером  $5 \times 5$  км с пространственным разрешением 25 м.  $D_x=D_y=10^{-3}$  кг·м<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>,  $h=\eta$ ,  $\rho_{sm}=0,5$  кг·м<sup>-3</sup>. Рельеф задается схематически (рис. 1), как симметричная относительно центра области ( $x_0=2,5$  км,  $y_0=2,5$  км) гора радиусом  $R_{max}=1500$  м и максимальной высотой  $s_{max}=500$  м, рельеф которой задается формулой:

$$s(i, j) = s_{max} \left\{ \cos \left[ \frac{\left( (x - x_0)^2 + (y - y_0)^2 \right)^{1/2}}{R_{max}} \frac{\pi}{2} \right] \right\}^2. \quad (5)$$

В уравнении (3) задается только зональная составляющая скорости ветра  $w_{10}=10$  м·с<sup>-1</sup>. Трансформация поля ветра [10] рассчитывается, исходя из угла наклона поверхности

$$\beta = \text{atan} \left[ \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \left( \frac{\partial h}{\partial y} \right) \right]^{1/2}, \quad (6)$$

ее азимута

$$\zeta = \frac{3\pi}{2} - \text{atan} \left[ \left( \frac{\partial h}{\partial y} \right) / \left( \frac{\partial h}{\partial x} \right) \right] \quad (7)$$

и топографической кривизны

$$\Omega_c = \frac{1}{4} \left[ \frac{h - 0.5(h_W + h_E)}{2\eta} + \frac{h - 0.5(h_S + h_N)}{2\eta} + \frac{h - 0.5(h_{SW} + h_{NE})}{2\sqrt{2}\eta} + \frac{(h_{NW} + h_{SE})}{2\sqrt{2}\eta} \right], \quad (8)$$

где  $hW$ ,  $hE$  и т.д. – значения высоты поверхности в узлах пространственной сетки в восьми направлениях на расстоянии  $\eta$  от ячейки, для которой производятся вычисления.

Выбор  $\eta$  в общем случае зависит от характера рельефа. В настоящей работе  $\eta=1$ . Угол наклона ячейки в направлении вектора ветра определяется формулой

$$\Omega_s = \beta \cos(\theta - \zeta), \quad (9)$$

где направление вектора скорости ветра определяется как

$$\theta = \frac{3\pi}{2} - \text{atan}\left(\frac{v}{u}\right), \quad (10)$$

а  $u$  и  $v$  – проекции вектора скорости ветра на пространственные оси.  $\Omega_c$  и  $\Omega_s$  нормируются таким образом, чтобы их значения лежали в диапазоне от  $-0,5$  до  $+0,5$ .

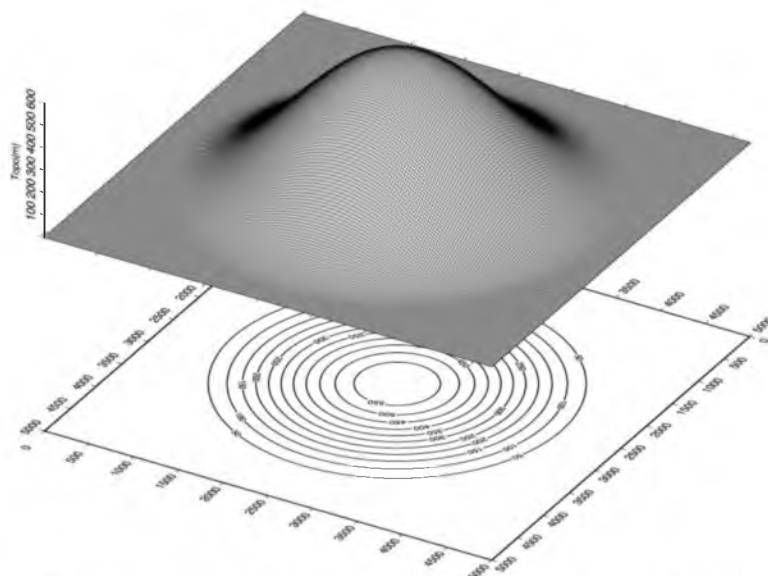


Рис. 1. Схематическое представление элемента рельефа (высота, м)

Фактор изменения скорости ветра  $w = \sqrt{u^2 + v^2}$  в приземном слое (рис. 2а) рассчитывается по формуле

$$w_t = W_w w, \quad (11)$$

где

$$W_w = 1 + \gamma_s \Omega_s + \gamma_c \Omega_c, \quad (12)$$

а веса  $\gamma_c$  и  $\gamma_s$  выбираются таким образом, чтобы их сумма равнялась единице.

В настоящей работе  $\gamma_c = \gamma_s = 0,5$ .

Рельеф меняет направление вектора скорости ветра (рис. 2б):  $\theta_t = \theta + \theta_d$ , где

$$\theta_d = -0.5 \Omega_s \sin [2(\zeta - \theta)]. \quad (13)$$

### Численные эксперименты, их результаты и обсуждение

Модельное поле скорости ветра ожидаемо трансформируется в окрестностях горы таким образом, что с наветренной стороны образуется область, где скорость более, чем на треть, выше первоначальной, а с подветренной на 20% ниже, и сам поток образует зону конвергенции с подветренной стороны (рис. 2). Было проведено три численных эксперимента, в которых первоначальное поле толщины снежного покрова (рис. 3а) перераспределялось стационарным полем ветра (рис. 2). Длительность экспериментов составила 30, 60 и 90 модельных минут (рис. 3 б-г).

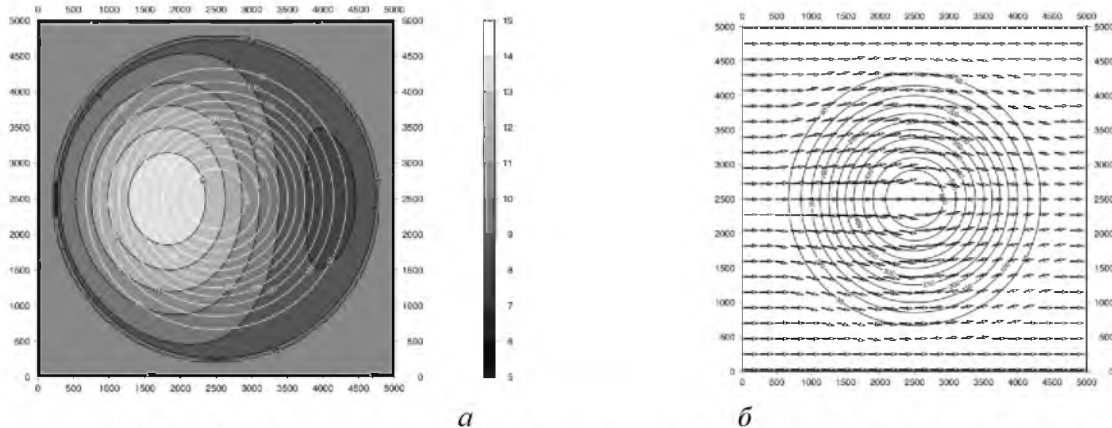


Рис. 2. Поля скорости, м/с, (а) и направления (б) ветра в приземном слое

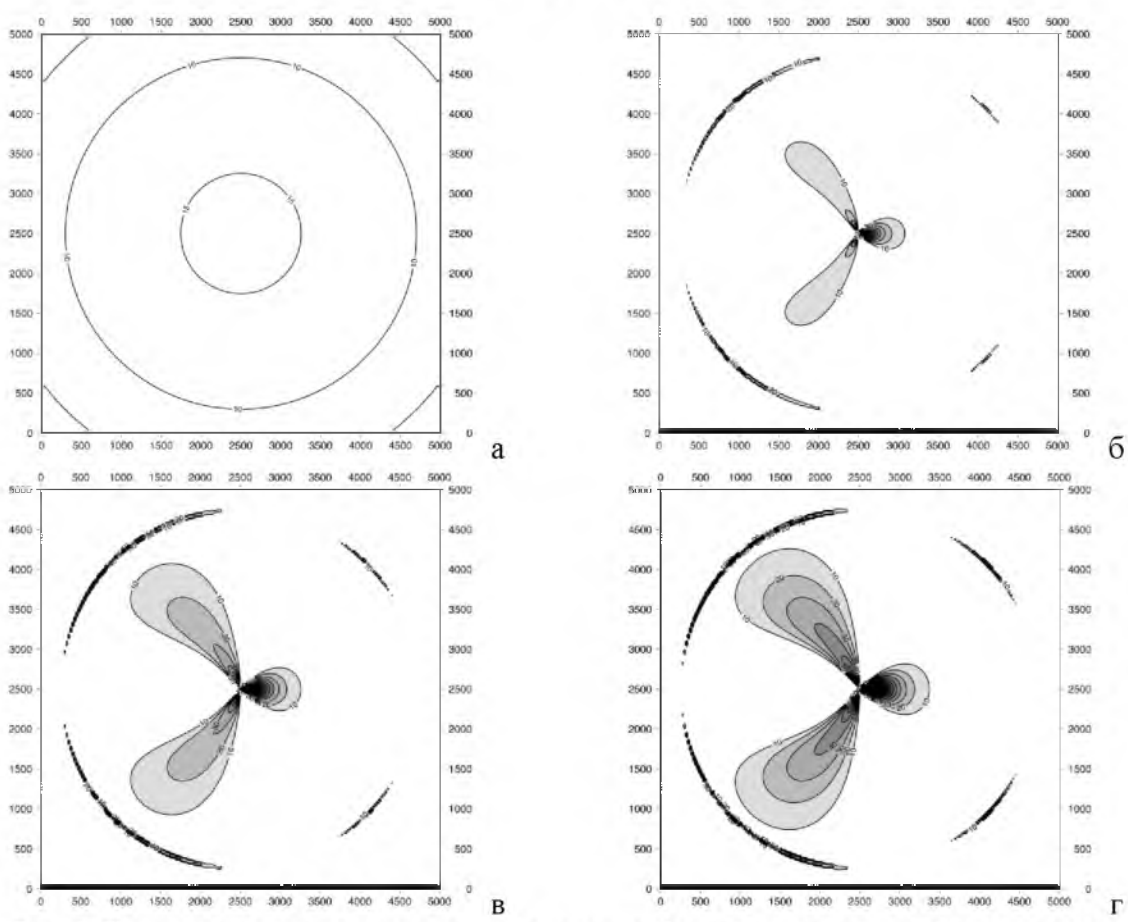


Рис. 3. Толщина снежного покрова, м: начальная (а) и полученная в ходе численных экспериментов после 30 (б), 60 (в) и 90 модельных минут интегрирования

Напомним, что по условиям эксперимента выпадения нового снега не происходит,  $S=0$  (ур. 1), т.е. приток массы, его таяние и сублимация не рассматриваются. Как и ожидалось, наиболее заметное уменьшение толщины снежного покрова происходит там, где скорость ветра растет – на наветренной стороне горы в области максимального роста скорости.

Максимальный рост приходится на подветренную часть за вершиной в области конвергенции потоков, где толщина растет многократно. Некоторое увеличение наблюдается по сторонам от зоны минимальной толщины, а также в узкой области резкого перегиба поверхности у границы горы. Накопление снега на подветренных участках характерно для распределения снега в реальных условиях [9, 10]. Отсутствие

механизма вертикального перераспределения снега ( $G_x$  и  $G_y$  в ур. 2) приводит к нереалистичной толщине снега на подветренной стороне у вершины горы.

Настоящую работу следует рассматривать как первую в серии статей, посвященных разработке эффективного алгоритма, описывающего процессы переноса снега в математической модели. В частности, предстоит выяснить роль горизонтальной турбулентной диффузии (некоторые наработки есть в работе [8]), дополнить описание эмулятором вертикального перераспределения массы, протестировать алгоритм на иных схематических конфигурациях рельефа и для реальных условий.

#### Литература

1. Machtguth H., Eisen O., Paul F., Hoelze M. Strong spatial variability of snow accumulation observed with helicopter-borne GPR on two adjacent Alpine glaciers // *Geophysical Research Letters*. 2006. V. 33. L13503. doi:10.1029/2006GL026576.
2. 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.
3. Торопов П.А., Михаленко В.Н., Кутузов С.С. и др. Температурный и радиационный режим ледников на склонах Эльбруса в период абляции за последние 65 лет // *Лед и Снег*. 2016. Т.56. - №1. - С. 5-19. doi:10.15356/2076-6734-2016-1-5-19.
4. Морозова П.А., Рыбак О.О. Регионализация данных глобального климатического моделирования для расчета баланса массы горных ледников // *Лед и Снег*. 2017. Т. 57. №4. С. 437-452. doi: 10.15356/2076-6734-2017-4-437-452.
5. Рыбак О.О., Рыбак Е.А. Применение данных сетевых метеорологических станций для расчета баланса массы ледников (на примере ледника Джанкуат, Центральный Кавказ) // *Системы контроля окружающей среды*. - 2017. - №3(29). - С. 100-108.
6. Mikhalenko V., Sokratov S., Kutuzov S. et al. Investigation of a deep ice core from the Elbrus western plateau, the Caucasus, Russia // *The Cryosphere*. 2015. V. 9. P. 2253-2270. doi:10.5194/tc-9-2253-2015.
7. Дюнин А.К. Механика метелей (Вопросы теории проектирования снегорегулирующих средств). - Новосибирск: Изд-во Сибирского отделения АН СССР, 1963. - 380 с.
8. Ohara N. A practical formulation of snow surface diffusion by wind for watershed-scale applications // *Water Resources Research*. 2014. V. 50. P. 5074-5089. doi:10.1002/2013WR014744.
9. Dyunin A.K., Kotlyakov V.M. Redistribution of snow on the mountains under the effect of heavy snowstorms // *Cold Regions Science and Technology*. 1980. V. 3. P. 287-294.
10. Liston G.E., Haehnel R.B., Sturm M. et al. Simulating complex snow distributions in windy environments using SnowTran-3D // *Journal of Glaciology*. 2007. V. 53(181). P. 241-256.