

# Методы расчета слоя таяния снега в антарктическом оазисе Холмы Ларсеманн\*

М. Р. Кузнецова, Г. В. Пряхина

Санкт-Петербургский государственный университет,  
Российская Федерация, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7–9

**Для цитирования:** Кузнецова, М. Р., Пряхина, Г. В. (2022). Методы расчета слоя таяния снега в антарктическом оазисе Холмы Ларсеманн. *Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле*, 67 (3), 515–528. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.307>

В настоящей статье рассматривается применимость методов расчета слоя таяния снега, традиционно используемых в гидрологии, для территории оазиса Холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида). Исходными данными являются собственные материалы снегомерных наблюдений, выполненных в сезон 65-й Российской Антарктической экспедиции (РАЭ) (2019–2020) на водосборах озер Лоу (LH-71), Рейд и Степед. Также использованы материалы фонда Арктического и Антарктического научно-исследовательского института (ААНИИ): данные снегомерных съемок сезонов 57-й РАЭ (2012) на водосборе озера Степед и 62-й РАЭ (2017) на водосборах озер Лоу, Рейд, Скандретт и Степед. Рассматриваются методы расчета слоя таяния снега по формулам П. П. Кузьмина, Е. Г. Попова, Ю. Б. Виноградова. Полученные результаты сопоставляются с величинами слоя таяния, определенными по данным снегомерных наблюдений. Выполнено два варианта расчета таяния: в первом случае альbedo снега задано посуточно через функцию старения снега, а во втором — как средняя за расчетный период величина по данным дистанционного зондирования. Результаты расчетов во многом определяются тем, как задана величина альbedo снега: при определении альbedo как постоянной величины относительная погрешность расчета уменьшилась для всех рассмотренных методов. Наименьшие величины ошибок расчетных значений слоя таяния относительно фактических значений, определенных по данным снегомерных съемок, получены по формуле П. П. Кузьмина. В большинстве рассмотренных случаев метод дает удовлетворительные результаты и может быть использован для выполнения оценочных расчетов величины слоя таяния на данной территории.

**Ключевые слова:** методы расчета снеготаяния, антарктические оазисы, Холмы Ларсеманн.

## 1. Введение

Природные условия антарктического региона определяют особенности протекания процессов снеготаяния и формирования талых вод в антарктических оазисах. Теплый период года для этих территорий составляет 2–3 месяца и характеризуется значительным поступлением солнечной радиации; температура воздуха

---

\* Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ № 20-05-00343 А.

© Санкт-Петербургский государственный университет, 2022

принимает отрицательные значения ночью и положительные днем, вследствие чего устойчивый переход через 0 °С не наступает. Сильные ветра и холмистый рельеф способствуют образованию навейных снежников, при этом сплошной снежный покров на территории не формируется. Снежники имеют неоднородное вертикальное строение: более рыхлые слои — сверху, плотные фирновые, содержащие значительные запасы воды, — внизу. В краевой части оазисов обычно присутствует ледник. Талые воды ледника и снежников формируют приток воды к озерам. Для территорий антарктических оазисов оценка величины притока является важной прикладной задачей: в рамках организации водоснабжения станций и полевых баз, выполнения водно-балансовых расчетов, определения величины водообмена озер при экологических оценках. Однако решение этой задачи во многом связано с расчетом величины слоя таяния.

Величина слоя таяния может быть определена по данным снегомерных наблюдений, но снегомерные съемки в антарктических оазисах проводят нерегулярно, в рамках отдельных научных программ. В условиях дефицита данных фактических измерений определение величины слоя таяния возможно с использованием методов, которые разрабатывались преимущественно в контексте прогноза весеннего стока рек. К наиболее известным относятся: метод теплового баланса, расчет через коэффициент стаивания, расчет через водный баланс снежного покрова (Бефани и Калинин, 1965). В математических моделях формирования стока при расчете таяния снега часто используют вышеперечисленные подходы. Так, в модели формирования талого стока SRM (Martinez et al., 2008) расчет выполняется через коэффициент соотношения температуры воздуха и величины слоя таяния (что, по сути, близко к коэффициенту стаивания); в мезомасштабной модели прогноза погоды WRF/ARW (Шихов и Связов, 2013) расчет ведется через коэффициент стаивания; в модели формирования талого стока на малых водосборах (Зиновьев и др., 2017) — через систему уравнений теплопереноса. В настоящей статье рассматривается возможность использования известных в гидрологии методов расчета слоя таяния для территории антарктического оазиса Холмы Ларсеманн.

## 2. Материалы и методы

В работе использованы материалы полевых исследований, полученные при участии авторов настоящей статьи и их коллег в 2019–2020 гг. в сезон 65-й Российской Антарктической экспедиции (РАЭ) в оазисе Холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида) (рис. 1). В связи с тем, что собственные материалы снегомерных наблюдений на момент написания статьи ограничены одним сезоном, было решено обратиться к доступным материалам фондов ААНИИ. Таким образом, дополнительно использованы результаты снегомерных съемок, выполненных в сезон 57-й РАЭ (2012 г., водосбор озера Степед) и в сезон 62-й РАЭ (2017 г., водосборы озер Лоу (LN-71) Скандретт, Рейд, Степед) (Фонды ААНИИ № О-3802, 2012; Фонды ААНИИ № О-4033, 2017) (рис. 1). Отметим, что хотя в рассматриваемые годы снегомерные наблюдения проводились в разные даты, но во всех случаях работы выполнялись в середине антарктического лета — в январе.

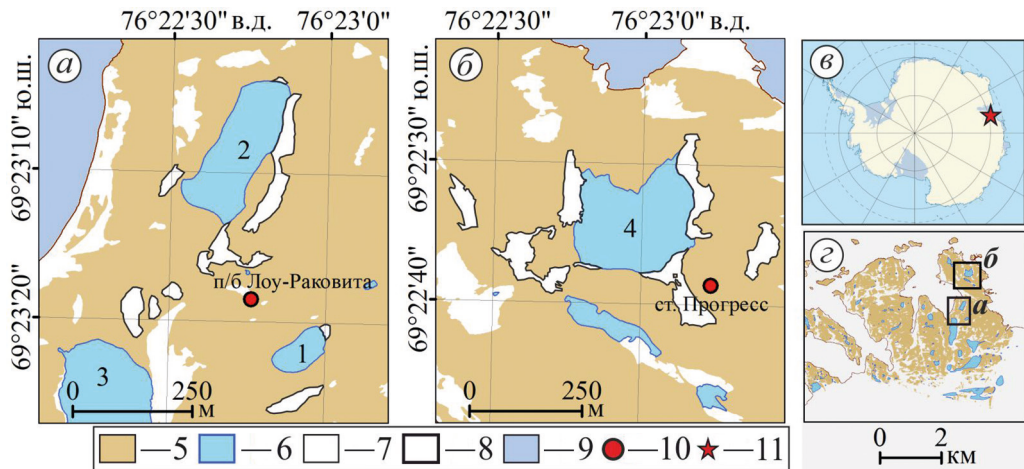


Рис. 1. Схема расположения снежников<sup>1</sup>. Снежники, где проводились снегомерные съемки в 2012, 2017 и 2019–2020 гг.: а — на водосборах озер Рейд, Лоу, Скандретт; б — на водосборе озера Степпед; в — расположение оазиса Холмы Ларсеманн; г — расположение участков на схемах а и б в оазисе; 1 — озеро Лоу; 2 — озеро Рейд; 3 — озеро Скандретт; 4 — озеро Степпед; 5 — бесснежные пространства; 6 — озера; 7 — снежники; 8 — снежники, на которых проводились снегомерные съемки; 9 — море; 10 — станции и полевые базы; 11 — местоположение оазиса Холмы Ларсеманн

## 2.1. Снегомерная съемка

В сезон 65-й РАЭ (2019–2020) снегомерная съемка на водосборах озер Лоу, Рейд, Степпед была выполнена с 27 по 28 декабря 2019 г. Координаты точек фиксировали спутниковым приемоиндикатором GARMIN-64. В точках съемки проводились определения плотности каждого выделенного однородного снежного слоя весовым методом (Казаков и др., 2018). Из каждого слоя снег отбирался снегомерным стаканом и взвешивался на электронных весах («Невские весы», Е68; точность весов 0.01 г). Высота снежного покрова и мощность каждого из снежных слоев измерялись строительной рулеткой («VIRA») от дна шурфа до его верхнего края. Съемка, выполненная на водосборе озера Лоу, является наиболее подробной: расстояние между точками в среднем составляло 20–30 м, в то время как на водосборах озер Рейд и Степпед — 20–50 м. Частота измерений была обусловлена размерами водосборов и площадями снежников. Через месяц, к началу февраля, рыхлые снежные слои полностью стаяли и многолетние снежники представляли собой прочные ледово-фирновые участки, поэтому повторная снегомерная съемка не выполнялась.

В программе Surfer 13 были построены схемы распределения запасов воды по площади (рис. 2) (интерполяция методом Kriging и сглаживание полученных схем методом скользящего среднего), рассчитаны объемы воды. Слой таяния определялся как отношение объема воды в снеге к площади снежника.

Определение площадей и границ снежников производилось в программе ArcGIS 10.1 по материалам аэрофотосъемок территории сезона 65-й РАЭ, выполненных и предоставленных авторам настоящей статьи С. Д. Григорьевой и Э. Р. Киньябаевой.

<sup>1</sup> URL: <https://www.bas.ac.uk/project/add/> (дата обращения: 03.07.2021).

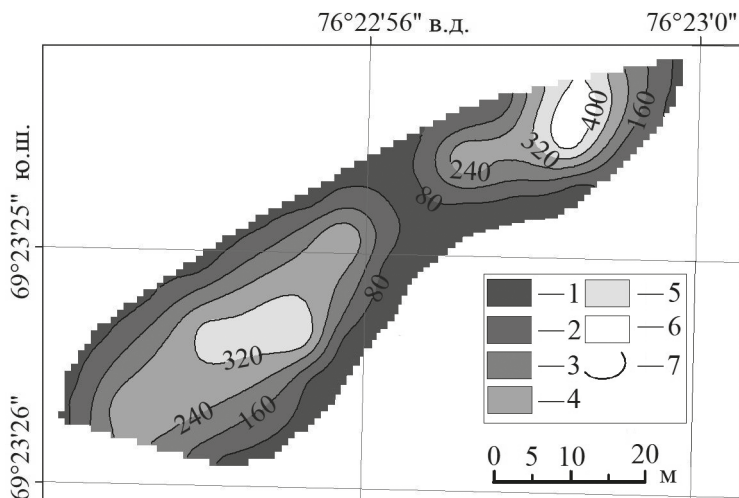


Рис. 2. Пример схемы распределения запаса воды, мм, в снежных слоях: снежник на водосборе озера Лоу (28.12.2019): 1 — запас воды 0–80; 2 — запас воды 80–160; 3 — запас воды 160–240; 4 — запас воды 240–320; 5 — запас воды 320–400; 6 — более 400; 7 — линии равных запасов воды

Для выполнения расчета слоя таяния плотность снега задавалась как средняя (по данным снегомерных съемок) величина за расчетный период. Так, для сезона 65-й РАЭ средняя плотность рыхлой снежной толщи составила  $450 \text{ кг/м}^3$ . Согласно данным отчета (Фонды ААНИИ № О-4033, 2017), в сезон 62-й РАЭ средняя плотность снежных слоев составляла также  $450 \text{ кг/м}^3$ , а в сезон 57-й РАЭ (Фонды ААНИИ № О-3802, 2012) — около  $160 \text{ кг/м}^3$ .

Расчеты слоя таяния были выполнены для каждого расчетного периода по трем методам: 1) по методу теплового баланса; 2) по эмпирической формуле Е. Г. Попова; 3) по методу температурных коэффициентов через эффективную температуру. Результаты вычислений сопоставлялись с фактическими величинами таяния, полученными по данным снегомерных наблюдений. Границы расчетных периодов определялись сроками выполнения снегомерной съемки. В качестве расчетных были приняты следующие периоды: 12.01.2012 — 05.02.2012 для водосбора озера Степед; 17.01.2017 — 03.02.2017 для водосборов озер Лоу и Скандретт; 11.01.2017 — 02.02.2017 для водосбора озера Рейд, 08.01.2017 — 01.02.2017 для водосбора озера Степед; 28.12.2019 — 06.02.2020 для водосборов озер Лоу, Рейд, Степед. Метеорологические данные, используемые в расчетах, предоставлены метеостанцией российской антарктической станции «Прогресс».

Величина альбедо в течение рассматриваемых в работе периодов в оазисе Холмы Ларсеманн не измерялась, поэтому ее значения задавались двумя способами (соответственно, рассмотрено два случая расчетов слоя таяния). В первом случае альбедо рассчитывалось через функцию старения снега  $S_{age}$ , учитывающую количество дней со дня последнего снегопада (Кзакова, 2015):

$$r = r_{\max} S_{age}(n) - r_{\min} S_{age}(n) \quad (1)$$

при

$$0^\circ < S_{age} < 1, \quad r_{\max} = 0.85, \quad r_{\min} = 0.40^\circ, \quad (2)$$

$$\Delta S_{age} = S_{age}(n) \left[ \frac{P_{snow(n)}}{P_{norm(n)}} - \frac{\Delta t(n)}{t_r(n)} \right], \quad (3)$$

$$S_{age}(n+1)^\circ = S_{age}(n) + \Delta S_{age}, \quad (4)$$

где  $r$  — альbedo (доли от единицы);  $r_{\min}$ ,  $r_{\max}$  — наименьшая и наибольшая величина альbedo соответственно;  $P_{norm}$  — нормальная скорость выпадения снега, мм/сут;  $P_{snow}$  — скорость выпадения снега, мм/сут;  $\Delta t$  — шаг по времени, сут,  $\Delta t = 1$  сут;  $t_r$  — длительность расчетного периода, сут;  $n$  — номер суток.

Во втором случае для определения среднего значения альbedo использовались данные спутниковых снимков MODIS «MOD10A1.006 Terra Snow Cover Daily Global 500m» (Earthengine.google.co, 2021). Поскольку снимки не покрывают всю территорию оазиса, а их разрешение ( $500 \times 500$  м) не позволяет определять значения альbedo для отдельных снежников, величины альbedo определялись для территории ледникового купола. Достоверность полученной таким способом величины альbedo проверялась путем сравнения с результатами натурных измерений альbedo, выполненных с 4 по 24 января 2018 г. и опубликованных в статье (Журавский и др., 2019), согласно которым значение альbedo снега на куполе ледника в районе аэродрома составляло порядка 0.80–0.85 в ясный день и при отсутствии ветра. Средняя величина альbedo, определенного по данным спутниковых снимков за тот же период, составила 0,9. Разброс относительной погрешности оказался равен 6–13 %, что в условиях отсутствия измеренных значений, по мнению авторов, дает возможность использования данных дистанционного зондирования. Величина альbedo по снимкам (при наличии данных) определялась за каждые два дня: на снимках за отдельные даты данные отсутствуют, что связано с облачностью. Посуточное определение было невозможно из-за технических особенностей каталога. Средняя за период величина альbedo рассчитывалась как среднее арифметическое.

Таким образом, при расчетах были использованы следующие средние значения альbedo: 0.75 (12.01.2012 — 05.02.2012); 0.72 (08.01.2017 — 01.02.2017, 11.01.2017 — 02.02.2017, 17.01.2017 — 03.03.2017); 0.68 (28.12.2019 — 06.02.2020).

## 2.2. Метод теплового баланса (метод П. П. Кузьмина)

Метод теплового баланса был записан П. П. Кузьминым в виде упрощенных формул, позволяющих рассчитать суточные величины интенсивности снеготаяния (Кузьмин, 1961):

$$h_c = 0.125[Q4.19(1-r)(1-0.20N_0-0.47N_n) - 1440\varepsilon\sigma4.19(T_n)^4 + 1440(0.62 + 0.05\sqrt{e_{200}})(1 + 0.12N_0 + 0.12N_n)(\varepsilon\sigma(T_a)^4)]4.19 + (a_c\gamma u_{10}). \quad (5)$$

Здесь  $Q$  — возможная суточная сумма суммарной солнечной радиации при безоблачном небе, Дж/см<sup>2</sup>;  $r$  — альbedo (доли от единицы);  $N_0$ ,  $N_n$  — общая и нижняя

облачность соответственно (доли от единицы);  $\varepsilon$  — относительная поглощательная способность длинноволновой радиации деятельным слоем снега, назначалась в зависимости от плотности снега (Красс и Мерзликин, 1990);  $\sigma$  — постоянная Стефана — Больцмана;  $T_a$  — температура воздуха, К; 4.19 — коэффициент для перевода единиц измерений из калорий в джоули;  $T_{\text{п}}$  — температура поверхности снега, К,

$$T_{\text{п}} = t_{\text{п}} + 273, \quad (6)$$

где  $t_{\text{п}}$  — температура поверхности снега, °С, по номограмме П. П. Кузьмина (Кузьмин, 1961);  $a_c$  — коэффициент,

$$a_c = 0.878 \frac{1 + 0.547 u_{10}}{u_{10}}, \quad (7)$$

где  $u_{10}$  — скорость ветра на высоте 10 м, м/с;  $\gamma$  — коэффициент,

$$\gamma = (t_2 - t_{\text{п}}) + 1.75(e_2 - e_{\text{п}}), \quad (8)$$

где  $t_2$  — температура воздуха на высоте 2 м, °С;  $t_{\text{п}}$  — температура поверхности снега, °С;  $e_2$  — упругость водяного пара на высоте 2 м, мбар;  $e_{\text{п}}$  — максимальная упругость водяного пара, мбар, при температуре поверхности снега  $t_{\text{п}}$ , рассчитана по эмпирической формуле Магнуса (Хромов и Петросянц, 2006)<sup>2</sup>,

$$e_{\text{п}} = E_0 10^{\left[ \frac{a t_{\text{п}}}{b + t_{\text{п}}} \right]}, \quad (9)$$

где  $E_0$  — давление насыщенного пара при  $t = 0$  °С, мбар,  $E_0 = 6.107$  мбар;  $a$ ,  $b$  — коэффициенты давления пара над льдом,  $a = 9.5$ ;  $b = 265.5$ ;  $t_{\text{п}}$  — температура поверхности снега, °С.

### 2.3. Эмпирическая формула Е. Г. Попова

Эмпирическая формула Е. Г. Попова основана на предположении о различиях в характере таяния снега в дневные и ночные часы (Бефани и Калинин, 1965). Эти различия, связанные с внутрисуточными изменениями температуры воздуха и ветровым режимом, присутствуют и в антарктическом оазисе Холмы Ларсеманн, хотя в январе (рассматриваемые в настоящей статье расчетные периоды приходятся преимущественно на январь) здесь полярный день. В формуле подразумевается, что сутки делятся на два равных интервала — по 12 ч каждый:

$$h_{\text{д}} = 7.1 \left[ (1-r) (t_{\text{max}} - t_{\text{ср.сут}} - 0.2) - 0.2 (t_{\text{ср.сут}} - t_{\text{min}}) + 0.1 u_{\text{д}} (t_{\text{д}} - 0.5) \right], \quad (10)$$

$$h_{\text{н}} = 7.1 \left[ 0.1 u_{\text{н}} (t_{\text{н}} - 0.5) - 0.2 (t_{\text{ср.сут}} - t_{\text{min}}) \right], \quad (11)$$

где  $h_{\text{д}}$ ,  $h_{\text{н}}$  — слой стаивания снега в дневные и ночные часы соответственно, мм;  $r$  — альbedo снега (доли от единицы);  $t_{\text{max}}$  — максимальная температура воздуха, °С;

<sup>2</sup> Результат расчета соответствуют данным таблицы насыщающей упругости водяного пара над поверхностью льда при различных температурах (<http://www.pogodaiklimat.ru/tables/table4.txt>).



$t_{\min}$  — минимальная температура воздуха, °C;  $t_d, t_n$  — средняя дневная и ночная температура воздуха соответственно, °C;  $t_{\text{ср.сут}}$  — средняя суточная температура воздуха, °C;  $u_d, u_n$  — средняя дневная и ночная скорости ветра соответственно, м/с.

В ночное время ветер может усиливаться за счет действия местного стокового ветра. В целом в течение суток скорость ветра изменяется неравномерно, возможны порывы как в ночное, так и в дневное время, поэтому  $u_d$  и  $u_n$  были приняты равными средней скорости ветра за сутки. Суммарный слой стаивания за сутки определялся как сумма положительных величин  $h_d$  и  $h_n$ .

#### 2.4. Метод температурных коэффициентов: эффективная температура воздуха

На основе предположения о том, что в общем случае в период отрицательных температур таяние снега может происходить за счет воздействия солнечной радиации, Ю. Б. Виноградовым (Виноградов, 1988) была предложена формула, где используется эффективная температура:

$$h_c = \zeta t_{\text{эф}} 8640000. \quad (12)$$

Здесь  $h_c$  — слой стаивания снежного покрова, мм/сут;  $t_{\text{эф}}$  — эффективная температура, °C,

$$t_{\text{эф}} = t_{\text{ср.сут}} + j_n S, \quad (13)$$

где  $t_{\text{ср.сут}}$  — среднесуточная температура воздуха, °C;  $j_n$  — коэффициент, м<sup>2</sup>с<sup>2</sup>/Дж,  $j_n = 0.1$ ;  $S$  — поглощенная радиация, Дж/м<sup>2</sup>с,

$$S = S' 4.19(1-r)(1-N)(1-K_3 M), \quad (14)$$

где  $r$  — альbedo (доли от единицы);  $N$  — затененность водосбора (доли от единицы), экспертная оценка,  $N=0.1$ ;  $K_3 = 0.5$  по (Виноградов, 1988);  $M$  — общая облачность по данным метеостанции «Прогресс» (доли от единицы);  $S'$  — радиация на горизонтальную поверхность, Дж/(м<sup>2</sup>с) (Сивков, 1968),

$$S' = \frac{\left( \frac{Q 4.19}{\sin h} - 0.68 \right)}{0.62}, \quad (15)$$

где  $Q$  — суммарная радиация, Дж/(м<sup>2</sup>с);  $h$  — высота солнца над горизонтом, град., определена как среднесуточные значения для 69°25' ю.ш. 76°35' в.д.<sup>3</sup>;  $\zeta$  — коэффициент стаивания снежного покрова,

$$\zeta = \zeta' \frac{\gamma'_c}{\rho'}, \quad (16)$$

где  $(\gamma'_c)$  — плотность твердой фазы снега, кг/м<sup>3</sup>;  $\rho'$  — плотность льда, кг/м<sup>3</sup>,  $\rho' = 920$  кг/м<sup>3</sup>;  $\zeta'$  — коэффициент стаивания льда, м/(с<sup>2</sup>),  $\zeta' = 10^{-8} 13.8$ .

<sup>3</sup> Онлайн-калькулятор, азимут и высота солнца над горизонтом. URL: <https://planetcalc.ru/320/> (дата доступа: 28.09.2021).

### 3. Результаты и обсуждение

Слои таяния, рассчитанные по данным снегомерных съемок, выполненных в пределах одного сезона на разных водосборах, хорошо соотносятся между собой (табл. 1). Исключением является слой таяния на снежниках водосбора озера Скандретт в сезон 62-й РАЭ, составивший 57 мм, что в 1.7 раза меньше, чем, например, аналогичная величина, определенная на водосборе озера Лоу за тот же период (95 мм). Авторы не готовы объяснить такое различие; к сожалению, в отчете за соответствующий сезон (Фонды ААНИИ № О-4033, 2017) пояснения также не приводятся.

Периоды, за которые определялись слои таяния в разные годы, различаются между собой по продолжительности. Поэтому для сопоставления слоев таяния за разные годы суммарные слои были пересчитаны в средние суточные (табл. 2). Отметим, что в январе 2020 г. в наиболее теплый среди рассматриваемых сезонов (сезон 65-й РАЭ), слои таяния составляли порядка 7–8 мм/сут, а в самый холодный сезон (сезон 57-й РАЭ) в январе 2012 г. всего 1 мм/сут. В сезон 62-й РАЭ они варьировали в пределах от 4 до 6 мм/сут. Четко выраженной зависимости величины слоя таяния от количества суммарной солнечной радиации выявлено не было: наибольшая суточная величина отмечалась в 57-й сезон (37 МДж/м<sup>2</sup>), тогда как в 62-й и 65-й сезоны она составляла порядка 23–24 МДж/м<sup>2</sup>.

Анализ ошибок расчетных значений слоя таяния относительно фактических, полученных по данным снегомерных съемок, показал, что наименьшие их величины дает метод П. П. Кузьмина (табл. 2, 3). При разном задании величины альбедо они составляют от 6 до 63 %, и лишь в случае расчета таяния снежников на водосборе озера Скандретт максимальная относительная ошибка оказалась равной 83 % (табл. 3). Остальные расчетные методы завышают значения слоя таяния.

В случае задания альбедо постоянной величиной относительная погрешность расчета уменьшилась по всем рассмотренным методам, за исключением формулы П. П. Кузьмина для водосборов озер Лоу и Рейд в сезон 62-й РАЭ. Здесь рассчитанный слой таяния оказался заниженным относительно значения, определенного по данным снегомерных съемок.

Различия в результатах расчета слоя таяния, выполненного разными методами, могут быть связаны с точностью исходных данных (альбедо, плотность снежного покрова), с недоучетом влияющих на процесс снеготаяния местных факторов или процессов. Согласно (Будник, 2010), точность определения слоя таяния тем или иным методом зависит также от степени влияния на таяние положительных температур воздуха или солнечной радиации.

В данной работе не рассматривается расчет по эмпирической формуле В. Д. Комарова, которая часто используется при оценке величины слоя таяния (Бефани и Калинин, 1965; Жидиков и Нечаева, 1982):

$$h = \alpha t_{\text{ср.сут}}^+ , \quad (17)$$

где  $h$  — слой таяния, мм водного эквивалента;  $\alpha$  — коэффициент стаивания, мм/град;  $t_{\text{ср.сут}}^+$  — положительная средняя суточная температура воздуха, °С.

Эта формула применяется при расчетах таяния снега в районах, где наступление весеннего периода сопровождается устойчивым переходом средней суточной



Таблица 1. Метеорологические характеристики и слой таяния, полученный по данным снегомерных съёмок

Слой таяния и метеорологические характеристики	57-я РАЭ		62-я РАЭ				65-я РАЭ			
	12.01.2012 — 05.02.2012	17.01.2017 — 03.02.2017	11.01.2017 — 02.02.2017	08.01.2017 — 01.02.2017	28.12.2019 — 06.02.2020					
	Озера									
	Степед	Лоу	Скандретт	Рейд	Степед	Лоу	Рейд	Степед	Лоу	Рейд
Слой таяния (по данным снегомерных съёмок), мм	29	95	57	121	90	323	280	332		
Количество дней в периоде	25	17	17	22	25	40	40	40		
Слой таяния, мм/сут	1	6	3	5	4	8	7	8		
Температура воздуха средняя среднесуточная, °С	-0.8	0.1		0.1	0.5		0.7			
Температура воздуха средняя минимальная, °С	-2.8	-2.1		-2.1	-1.7		-1.5			
Температура воздуха средняя максимальная, °С	1.7	2.8		2.9	3.2		3.2			
Суммарная солнечная радиация, (МДж/м <sup>2</sup> )/сут	37	23		24	23		23			

Таблица 2. Слой таяния (мм), полученный по расчетным формулам

Метод расчета слоя таяния	57-я РАЭ		62-я РАЭ				65-я РАЭ	
	12.01.2012 — 05.02.2012		17.01.2017 — 03.02.2017	11.01.2017 — 02.02.2017	08.01.2017 — 01.02.2017	28.12.2019 — 03.02.2020		
	Степед	Лоу	Скандретт	Рейд	Степед	Лоу	Рейд	Степед
Формула Ю. Б. Виноградова**	96/45	162/122	162/122	203/162	241/192	483/480	483/480	483/480
Формула П. П. Кузьмина**	41/33	104/26	104/26	143/66	112/101	366/342	366/342	366/342
Формула Е. Г. Попова**	194/101	167/137	167/137	204/176	230/201	400/389	400/389	400/389
<b>Снегомерная съемка</b>	<b>29</b>	<b>95</b>	<b>57</b>	<b>121</b>	<b>90</b>	<b>323</b>	<b>280</b>	<b>332</b>

\* Снегомерная съемка выполнена на снежниках, расположенных в северо-восточной части водосбора озера Скандретт.

\*\* Результаты расчета при разных альбедо: альбедо как функция старения снега / альбедо как средняя величина.

Таблица 3. Относительная ошибка слоя таяния (%), полученного по расчетным формулам

Метод расчета слоя таяния	57-я РАЭ		62-я РАЭ				65-я РАЭ	
	12.01.2012 — 05.02.2012		17.01.2017 — 03.02.2017	11.01.2017 — 02.02.2017	08.01.2017 — 01.02.2017	28.12.2019 — 03.02.2020		
	Степед	Лоу	Скандретт	Рейд	Степед	Лоу	Рейд	Степед
Формула Ю. Б. Виноградова**	227/54	70/23	186/106	68/29	168/105	50/49	72/71	46/45
Формула П. П. Кузьмина**	40/13	9/63	83/38	18/40	25/13	13/6	31/22	10/3
Формула Е. Г. Попова**	563/243	75/41	194/136	69/43	156/119	24/20	43/39	21/17

\* Снегомерная съемка выполнена на снежниках, расположенных в северо-восточной части водосбора озера Скандретт.

\*\* Результаты расчета при разных альбедо: альбедо как функция старения снега / альбедо как средняя величина.

температуры воздуха через 0 °С. В антарктическом регионе этого не происходит: в теплый период года температура воздуха в ночные и утренние часы принимает отрицательные значения, а днем — положительные. При этом средняя за сутки температура воздуха часто соответствует отрицательным значениям. Поэтому согласно формуле (17) таяние не происходит, что противоречит действительности: в дневной период происходит активное таяние и водоотдача из снега. Таким образом, указанная формула не может быть применена для расчета слоя таяния в антарктическом регионе.

#### 4. Заключение

Задача оценки величины слоя таяния рыхлого снежного покрова для территорий антарктических оазисов может быть решена с помощью методов расчета таяния, традиционно используемых в гидрологии. Наилучшие результаты получены по методу П. П. Кузьмина. Однако разброс ошибок расчета относительно данных, полученных по снегомерным съемкам, достаточно велик (от 3 до 50 % и более), что требует отдельного анализа их причин, в число причин, в частности, входят детальность определения плотности снежного покрова, определение альбедо и некоторые другие. Как показали результаты расчетов, относительная ошибка определения слоя таяния во многом зависит от определения величины альбедо: это обстоятельство представляет особый интерес в связи с отсутствием данных ежедневных измерений альбедо и необходимостью задавать эту величину. Наряду с этим достаточно широко используемая формула В. Г. Комарова не может быть применена в оазисе Холмы Ларсеманн в силу природных особенностей территории.

Применимость рассмотренных методов для территорий других антарктических оазисов еще предстоит проанализировать. С одной стороны, схожие физико-географические условия определяют особенности природных процессов антарктического региона (значительное поступление солнечной радиации, отсутствие устойчивого перехода температур через 0 °С и др.) и позволяют предположить, что полученные для Холмов Ларсеманн выводы будут справедливы и для других оазисов. С другой стороны, применимость того или иного расчетного метода к конкретной территории может быть достоверно подтверждена только результатами непосредственных расчетов.

#### Литература

- Бефани, Н. Ф., Калинин, Г. П. (1965). *Упражнения и методические разработки по гидрологическим прогнозам*. Л.: Гидрометеоиздат.
- Будник, С. В. (2010). *Талый сток со склонов*. Житомир.
- Виноградов, Ю. Б. (1988). *Математическое моделирование процессов формирования стока: опыт критического анализа*. Л.: Гидрометеоиздат.
- Жидиков, А. П., Нечаева, Н. С. (1982). *Методические указания по разработке схем краткосрочных прогнозов расходов воды рек и притока воды в водохранилища в период половодья на основе моделей талого стока (на примере бассейна р. Волги), под ред. канд. техн. наук В. А. Бельчикова*. Л.: Гидрометеоиздат.
- Журавский, Д. М., Прохорова, У. В., Иванов, Б. В., Янжура, А. С., Куприков, Н. М., Курапов, М. В. (2019). Полевые испытания методики фотограмметрической оценки альбедо снежно-ледовых поверхностей. *Исследование Земли из космоса*, 4, 18–28. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019418-28>

- Зиновьев, А. Т., Кудишин, А. В., Коломейцев, А. А., Ловцкая, О. В., Филимонов, В. Ю. (2017). Модель формирования талого стока на малых водосборах на примере реки Лосиха (Алтайский край). *Известия АО РГО*, 46 (3), 74–79.
- Казakov, Н. А., Генсиоровский, Ю. В., Жируев, С. П. (2018). Литолого-стратиграфические комплексы снежного покрова. *Криосфера Земли*, 22 (1), 72–93. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-1\(72-93\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-1(72-93))
- Казакова, Е. А. (2015). *Ежедневная оценка локальных значений и объективный анализ характеристик снежного покрова в рамках системы численного прогноза погоды COSMO-RU*. Дис. ... канд. физ.-мат. наук. М.
- Красс, М. С., Мерзликин, В. Г. (1990). *Радиационная теплофизика снега и льда*. Л.: Гидрометеоздат.
- Кузьмин, П. П. (1961). *Процессы стаивания снежного покрова*. Л.: Гидрометеоздат.
- Сивков, С. И. (1968). *Методы расчета характеристик солнечной радиации*. Л.: Гидрометеоздат.
- Фонды ААНИИ № О-3802 (2012). *Научно-технический отчет выполнения программ сезонных гидроэкологических работ на станции Прогресс в период сезонной 57 РАЭ. Отв. исполн.: А. И. Зубов, А. А. Краснов. Антарктида, оазис Холмы Ларсеманн [научно-технический отчет]*. СПб.
- Фонды ААНИИ № О-4033 (2017). *Научно-технический отчет по программе гидрологических исследований на станции Прогресс в сезонный период 62-й РАЭ. Отв. исполн.: Ю. А. Дворников. Санкт-Петербург [научно-технический отчет]*. СПб.
- Хромов, С. П., Петросянц, М. А. (2006). *Метеорология и климатология*. М.: Изд-во МГУ.
- Шихов, А. Н., Свиязов, Е. М. (2013). Прогнозирование динамики процесса снеготаяния на Западном Урале с применением мезомасштабной модели WRF/ARW. *Современные проблемы науки и образования*, 4, 397–405.
- Bas.ac.uk. Antarctic Digital Database (ADD), Version 7.0, January 2016 (2016). Scientific Committee on Antarctic Research, British Antarctic Survey, Cambridge. [online] Available at: <https://www.bas.ac.uk/project/add/> [Accessed 03.07.2021].
- Earthengine.google.co (2021). *Каталог Google Earth Engine, данные спутниковых снимков MODIS «MOD10A1.006 Terra Snow Cover Daily Global 500m»*. [online] Available at: <https://earthengine.google.com/> [Accessed 28.09.2021].
- Martinez, J., Rango, A. and Roberts, R. (2008). *Snowmelt runoff model. User's manual*. College of Agriculture and Home Economics. February.

Статья поступила в редакцию 18 октября 2021 г.  
Статья рекомендована к печати 15 июня 2022 г.

Контактная информация:

Кузнецова Мария Руслановна — [rotefliege@mail.ru](mailto:rotefliege@mail.ru)  
Пряхина Галина Валентиновна — [g.pryahina@spbu.ru](mailto:g.pryahina@spbu.ru)

## Methods of snowmelt calculation in the Antarctic oasis Larsemann Hills\*

M. R. Kuznetsova, G. V. Priakhina

St Petersburg State University,  
7–9, Universitetskaya nab., St Petersburg, 199034, Russian Federation

**For citation:** Kuznetsova, M. R., Priakhina, G. V. (2022). Methods of snowmelt calculation in the Antarctic oasis Larsemann Hills. *Vestnik of Saint Petersburg University. Earth Sciences*, 67 (3), 515–528. <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.307> (In Russian)

This paper studies the validity of snowmelt calculation methods, which are mostly used in hydrology, for the Larsemann Hills oasis (East Antarctica). The study bases on snow surveys

---

\* This work is supported by the Russian Foundation for Basic Research under grant No. 20-05-00343 A.

data obtained on catchments of Law Lake, Reid Lake and Stepped Lake during the 65<sup>th</sup> season of the Russian Antarctic Expedition (RAE) in 2019–2020. Materials of the fond of Arctic and Antarctic Research Institute (AARI) are also used: snow surveys data collected on the catchment of Stepped Lake during the 57<sup>th</sup> RAE season in 2012 and on catchments of Law Lake, Reid Lake, Scandrett Lake and Stepped Lake during the 62<sup>th</sup> RAE season in 2017. Considered three methods of snowmelt calculation were derived by P. P. Kuz'min, E. G. Popov, Yu. B. Vinogradov. Results of calculation are compared with snowmelt value obtained according to snow surveys. The paper shows two variants of calculations: in the first albedo of snow is determined from function of snow age as different values for each day, in the second albedo is determined from remote sensing data as average value for all period. Results of snowmelt calculation depend on the method which sets value of snow albedo: relative inaccuracies of results obtained of all discussed methods are smaller when albedo is determined as average value. The equation by Kuz'min gives the smallest inaccuracies of snowmelt calculation results in relative to real snowmelt values estimated from snow survey data. This snowmelt calculation method in the majority of cases reviewed gives satisfactory results and should be recommended for estimation of snowmelt values for this Antarctic territory.

*Keywords:* methods of snowmelt calculation, Antarctic oases, Larsemann Hills.

## References

- Bas.ac.uk. Antarctic Digital Database (ADD), Version 7.0, January 2016 (2016). Scientific Committee on Antarctic Research, British Antarctic Survey, Cambridge. [online] Available at: <https://www.bas.ac.uk/project/add/> [Accessed 03.07.2021].
- Befani, N. F. and Kalinin, G. P. (1965). *Exercises and methodological developments in hydrological forecasts*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (In Russian)
- Budnik S. V. (2010). *Melt runoff from the slopes*. Zhitomir. (In Russian)
- Earthengine.google.co (2021). *Catalog Google Earth Engine, satellite images data MODIS «MOD10A1.006 Terra Snow Cover Daily Global 500m»*. [online] Available at: <https://earthengine.google.com/> [Accessed 28.09.2021].
- Fondy AANII № O-3802 (2011–2012). *Scientific and technical report on the implementation of programs for seasonal hydroecological work at Progress station during the seasonal period of 57<sup>th</sup> RAE*. Otv. ispoln.: A. I. Zubov, A. A. Krasnov. *Antarktida, oazis Kholmy Larsemann*. (In Russian)
- Fondy AANII № O-4033 (2017). *Scientific and technical report on the program of hydrological research at Progress station during the seasonal period 62<sup>nd</sup> RAE*. Otv. ispoln.: Yu. A. Dvornikov. St Petersburg. (In Russian)
- Kazakov, N. A., Gensiorovskii, Iu. V. and Zhiruev, S. P. (2018). Snow lithostratigraphic complexes. *Earth's Cryosphere*, 22 (1), 72–93. [https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-1\(72-93\)](https://doi.org/10.21782/KZ1560-7496-2018-1(72-93)) (In Russian)
- Kazakova, E. A. (2015). *Daily assessment of local values and objective analysis of snow cover characteristics within the framework of the COSMO-RU numerical weather forecasting system*. PhD thesis. Moscow. (In Russian)
- Khromov, S. P. and Petrosyants, M. A. (2006). *Meteorology and climatology*. Moscow: Moscow University Press. (In Russian)
- Krass, M. S. and Merzlikin, V. G. (1990). *Radiation thermal physics of snow and ice*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (In Russian)
- Kuz'min, P. P. (1961). *Snow melting processes*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (In Russian)
- Martinec, J., Rango, A. and Roberts, R. (2008). *Snowmelt runoff model. User's manual*. College of Agriculture and Home Economics. February.
- Shikhov, A. N. and Sviyazov, E. M. (2013). Forecasting of the dynamics of snow melting in the Western Ural region, using WRF/ARW mesoscale model. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniia*, 4, 397–405. (In Russian)
- Sivkov, S. I. (1968). *Methods for calculating the characteristics of solar radiation*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (In Russian)

- Vinogradov, Yu. B. (1988). *Mathematical modeling of runoff formation processes: experience of critical analysis*. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (In Russian)
- Zhidikov, A. P. and Nechaeva, N. S. (1982). *Methodological guidelines for the development of schemes for short-term forecasts of river water discharge and water inflow into reservoirs during the flood period based on melt runoff models (for example, the Volga river basin)*. Pod red. kand. tekhn. nauk V. A. Bel'chikova. Leningrad: Gidrometeoizdat Publ. (In Russian)
- Zhuravskii, D. M., Prokhorova, U. V., Ivanov, B. V., Ianzhura, A. S., Kuprikov, N. M., and Kurapov, M. V. (2019). Field tests of photogrammetric evaluation technique of snow-glacial surface albedo. *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 4, 18–28. <https://doi.org/10.31857/S0205-96142019418-28> (In Russian)
- Zinov'ev, A. T., Kudishin, A. V., Kolomeitsev, A. A., Lovtskaya, O. V. and Filimonov, V. Yu. (2017). Model of snowmelt runoff formation in small catchments (Losikha river as a case study, Altai region). *Izvestiia AO RGO*, 46 (3), 74–79. (In Russian)

Received: October 18, 2021

Accepted: June 15, 2022

#### Authors' information:

Mariia R. Kuznetsova — [rotefliege@mail.ru](mailto:rotefliege@mail.ru)

Galina V. Priakhina — [g.pryahina@spbu.ru](mailto:g.pryahina@spbu.ru)