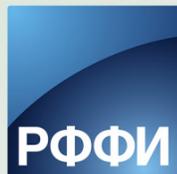




ГЭТРИ



Международная конференция памяти
выдающегося русского
гидролога Ю.Б. Виноградова



ГРАНИ ГИДРОЛОГИИ

ТРЕТЬИ ВИНОГРАДОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

ГРАНИ ГИДРОЛОГИИ

Сборник материалов

28-30 марта 2018

2018

Санкт-Петербургский государственный университет

ISBN

УДК 556

Международная научно-практическая конференция «Третьи Виноградовские Чтения. Грани гидрологии» памяти выдающегося русского ученого Ю.Б. Виноградова (28-31 марта 2018 г., Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург, Россия). Сборник докладов

International conference "Third Vinogradov's Conference. Facets of Hydrology" in memory of outstanding Russian scientist Yury Vinogradov (28-31 March, 2018, St. Petersburg State University, Russia). The Book of Proceedings

Использование физико-математической модели таяния снега и льда AMelt для реконструкции баланса массы ледников Внутреннего Тянь-Шаня

Рец Е.П.¹, Петраков Д.А.², Шпунтова А.М.²

¹Институт водных проблем Российской академии наук, лаборатория гидрологии речных бассейнов, Москва, Россия

²Географический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова, Москва, Россия
retska@mail.ru

Аннотация: Невозможность охвата прямыми масс-балансовыми наблюдениями большого количества ледников диктует необходимость развития альтернативных способов оценки баланса. Физико-математическая модель таяния снега и льда AMelt была использована для реконструкции баланса массы за 2004-2015 гг. ледников Сары-Тор и №354, расположенных в пределах массива Ак-Шийрак, внутренний Тянь-Шань. Проверка результатов показала хорошее воспроизведение моделью прямых измерений таяния и уменьшения поверхности ледников по данным высокодетальных космических снимков.

Ключевые слова: Моделирование баланса массы ледников, физико-математическая модель таяния снега и льда AMelt, ледник Сары-Тор, ледник № 354, Тянь-Шань

Введение

В стоке основных рек Средней Азии ледники Тянь-Шаня играют значимую роль. В летнее время доля ледникового питания в стоке рек составляет 20-40%, достигая 70-80% в жаркие засушливые года. Для данного региона характерны высокие темпы сокращения площади ледников, которое, как ожидается, приведет в дальнейшем к понижению стока рек в летнее время (Hagg et al., 2013). Талые воды ледников Тянь-Шаня широко используются для орошения аридных предгорий, поэтому данные о балансе массы ледников этого района весьма актуальны. Для корректного прогнозирования грядущей эволюции ледников и связанным с ним изменением водообеспеченности требуется детальная информация об отклике оледенения на современные и прошлые изменения климата. Такую информацию могут дать как прямые наблюдения за балансом массы, так и моделирование массообмена ледника.

Прямые наблюдения за балансом ледников Внутреннего Тянь-Шаня были прекращены вскоре после развала Советского Союза. Именно такая ситуация сложилась и на леднике Сары-Тор, признанном опорным для оледенения массива Ак-Шийрак, и бывшим объектом масс-балансового мониторинга в 1985-1991 гг. Ледники Сары-Тор и №354 расположены в верховьях бассейна Нарына в пределах массива Ак-Шийрак. Ледник №354 был объектом прямых измерений баланса массы в 2011-2017 гг. (Kronenberg et al., 2016).

Данные и методы

Для моделирования баланса массы ледников Сары-Тор и 354 была использована физико-математическую модель таяния снега и льда в высокогорных бассейнах с распределенными параметрами AMelt, разработанная Рец Е.П. (2011). В основе моделирования таяния снега лежит решение уравнения теплового баланса в каждой точке расчетной сетки:

$$h_c = 10 \frac{\omega}{L} = \frac{\omega}{8}, \quad (1)$$

$$\omega = (S_s + S_w)(1 - A) + E_s - E_{\pm} \pm \omega_{\pm} \pm Q_{\pm} \pm Q_s, \quad (2)$$

где h_m – слой талой воды, мм; L – скрытая теплота плавления снега, равная 80 кал/г; ω – тепловой баланс поверхности снега или льда, кал/см²; S_s – проходящая прямая

коротковолновая радиация; $S_{д}$ – то же, рассеянная; A – альbedo поверхности; E_a – встречное излучение атмосферы; E_s – длинноволновое излучение земной поверхности; ω – турбулентный (явный) теплообмен с атмосферой; $\omega_{ск}$ – скрытый поток тепла, обусловленный испарением и конденсацией; Q_m – поток тепла через чехол моренных отложений; Q_s – изменение энергии за счёт охлаждения и нагревания снега.

Ранее модель была апробирована для ледника Джанкуат (Северный Кавказ) (Рец и др., 2011, Рец и др., 2014). Сравнение результатов моделирования с результатами непосредственных наблюдений на сети абляционных рек показало хорошую воспроизводимость моделью данных натуральных наблюдений. Коэффициент корреляции составляет 0.96-0.98, систематическое отклонение фактически отсутствует (Рец и др., 2011, Рец и др., 2014).

Для адаптации к климатическим условиям Средней Азии модель потребовала доработки. В модель были добавлены блоки расчета повторного замерзания воды в толще снега и на границе снег-лед, фильтрации воды через снежную толщу. Снежная толща в расчетной схеме представлена как система слоев, между которыми происходит теплопередача и гравитационная фильтрация воды. Также был добавлен расчет водоотдачи с единицы площади ледника.

Входными данными в модель послужили: 1) Цифровая модель рельефа, составленная из высокодетальной модели полученной для поверхности ледников Сары-Тор и 354 из стереопары GeoEye (29/07/2012) и цифровой модели SRTM для окружающих форм рельефа; 2) Метеорологические данные с разрешением в 1 час за 2003-2014 гг. с автоматической метеостанции Campbell, расположенной менее чем в 5 км от ледника, были предоставлены Кумтор Голд Компании; 3) Фирновая линия и границы ледников для каждого года определялись по снимкам Landsat.

Для калибровки таких параметров модели как градиент осадков, температурный скачок и градиент температуры, параметр концентрации осадков, толщина расчетного слоя снега и поверхностного слоя льда использовались данные изменения таяния по речной сети на ледниках Сары-Тор и №354 в 2014-2015 гг. Были проведены тесты чувствительности модели к изменениям калибруемых параметров, показавший хорошую устойчивость расчетной схемы: при изменении значений толщина расчетного слоя снега и поверхностного слоя льда на порядок, завышение темпов таяния происходило в пределах 20-30%.

Результаты

Результаты моделирования представляют собой расчет слоя таяния снега, фирна и льда, и слой водоотдачи в каждой точке регулярной сетке (30*30 м) в каждый шаг времени (1 час).

Для верификации результатов моделирования было проведено сравнение изменения высоты поверхности ледника Сары-Тор за период 2003-2013 по стереопарам высокодетальных космических снимков QuickBird и GeoEye (Petraikov et al., 2016) с суммарным смоделированным значением баланса массы ледника за этот период. Среднее уменьшение высоты поверхности по геодезическому методу составило 3.8 м, по данным моделирования – 3.48 м. Отклонение результатов моделирования составило 8.4%, таким образом, можно говорить о том, что результаты моделирования при помощи модели AMelt достоверно отображают динамику баланса массы ледника. В среде R был написан модуль, формирующий карты суммарных годовых значений элементов баланса массы ледника (аккумуляция, абляция, баланс массы).

Годовые значения аккумуляции на леднике Сары-Тор по данным моделирования изменяются год от года в пределах 0.8 – 1.4 м в.э. (метры водного эквивалента), значения абляции – от -1 до -1.8 м в.э. (рис. 16). Баланс массы ледника отрицателен для

большинства лет в течение исследуемого периода (в среднем -0.49 м в.э. в год), его динамика повторяет тенденции, отмечаемые на ледниках Тянь-Шаня по данным прямых наблюдений (рис. 16-17). Единственным положительным с точки зрения баланса массы годом явился 2009, за счет низкой абляции и повышенной аккумуляции, наблюдавшейся в этом году. Положительный или слабоотрицательный баланс массы в 2009 году также характерен для большинства ледников Тянь-Шаня (рис. 17).

В результате моделирования на ледниках Сары-Тор и № 354 было установлено их активное таяние и изменение массы (рис. 1). В период с 2004 по 2015 год баланс массы ледников практически всегда имел отрицательное значение, что подтверждает гипотезу дегляциации в регионе и в том числе на массиве Акшийрак. В среднем, исследуемые ледники теряли около 0.5 м массы в водном эквиваленте (в.э.) в течение 2004-2015 гг. Колебания характеристик баланса массы на ледниках Сары-Тор и №354 достаточно синхронны и совпадают с региональными тенденциями (рис. 1). Ледник Сары-Тор терял массу более интенсивно в первую половину расчетного периода, 354-ый – во вторую. Единственный год, когда наблюдался положительный баланс массы на обоих ледниках – 2009 г. Для него характерны относительно большие значения аккумуляции (более 1.5 м в.э.) и низкие значения абляции (-1.2 м в.э.). Это соответствует условиям холодного, многоснежного лета. В 2009 г. положительный баланс массы наблюдался практически на всех исследуемых ледниках Тянь-Шаня согласно оценкам различных авторов (рис. 1).

Результаты моделирования для ледника № 354 были сопоставлены с опубликованными исследованиями по восстановлению его баланса массы с применением концептуальных подходов к моделированию (Kroneneberg et al, 2016). Наибольшую сходимость данные нашего исследования и Kroneneberg (2016) показывают в 2011-2014 года, когда эмпирическая модель Kroneneberg (2016) калибровалась по данным натурных наблюдений.

Специально разработанный R-скрипт позволяет визуализировать поля компонент баланса массы расчетного ледника. По полученным результатам моделирования прослеживается тесная связь между балансом массы между ледниками №354 и Сары-Тор. Данная взаимосвязь позволяет перенести длинный ряд наблюдений с ледника Сары-Тор на ледник №354, что актуально в контексте современных обсуждений возможности ледника №354 «приемником» гляциологических наблюдений на леднике Сары-Тор, на территории которого в ближайшую декаду будет развиваться золотодобыча согласно плану развития золотодобывающей компании «Кумтор».

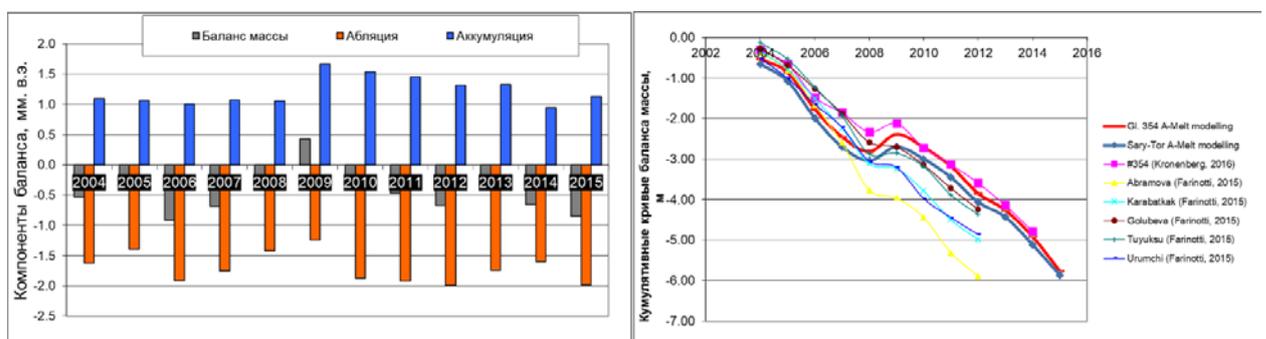


Рис. 1. Многолетний ход компонент баланса массы ледника №354 по данным моделирования (слева). Сравнение кумулятивного баланса массы ледника Сары-Тор и №354 с другими ледниками Тянь-Шаня по оценкам из литературных источников (справа) (Farinotti et al, 2015, Kronenberg et al, 2016).

Модель A-Melt также позволяет определить величину водоотдачи с поверхности ледника в каждой точке расчетной сетки в каждый временной момент. Максимальная

водоотдача характерна для нижней части ледника, первых зон. С ростом высоты зон водоотдача равномерно уменьшается и в верхних зонах близка к 0.

Выводы

Реализация физико-математической модели таяния снега и льда в высокогорных бассейнах с распределенными параметрами AMelt на примере ледников Сары-Тор и №354 показывает применимость модели для восстановления значения баланса массы ледников Внутреннего Тянь-Шаня. Согласно результатам моделирования, в среднем, исследуемые ледники теряли около 0.5 м массы в водном эквиваленте (в.э.) в течение 2004-2015 гг. Колебания характеристик баланса массы на ледниках Сары-Тор и №354 достаточно синхронны и совпадают с региональными тенденциями. Результаты моделирования для ледника № 354 были сопоставлены с опубликованными исследованиями по восстановлению его баланса массы с применением концептуальных подходов к моделированию.

Работа выполнена при поддержке РФФИ, проект № 16-35-60042

Список литературы

Рец Е.П., Фролова Н.Л., Поповнин В.В. Моделирование таяния поверхности горного ледника // Лёд и Снег, № 4., 2011: 24–31.

Рец Е.П., Киреева М.Б., Лошакова Н.А. Использование теплобалансовой модели для исследования особенностей формирования стока ледниковой реки (на примере бассейна руч. Джанкуат) // Евразийский Союз Ученых (ЕСУ), № 4., 2014.: 97-103.

Farinotti, D., Longuevergne, L., Moholdt, G., Duethmann, D., Mölg, T., Bolch, T., Vorogushyn, S., Güntner, A. Substantial glacier mass loss in the Tien Shan over the past 50 years. // Nature Geosciences, 7 pp., DOI: 10.1038/NNGEO2513

Hagg, W., Mayer, C., Lambrecht, A., Kriegel, D., Azizov, E. Glacier changes in the Big Naryn basin, Central Tian Shan // Global and Planetary Change 110, 2013: 40–50.

Kronenberg, M., Barandun, M., Hoelzle M., Huss, M., Farinotti, D., Azizov E., Usubaliev R., Gafurov, A., Petrakov, D., Kaab, A. Mass-balance reconstruction for Glacier No. 354, Tien Shan, from 2003 to 2014. // Annals of Glaciology 57(71), 2016: 11-23.

Petrakov, D., Shpuntova, A., Aleinikov, A., Kääh, A., Kutuzov, S., Lavrentiev, I., Stoffel, M., Tutubalina, O., Usubaliev, R. Accelerated glacier shrinkage in the ak-shyirak massif, inner tien shan, during 2003-2013. // Science of the Total Environment, 562., 2016: 364–378.

Using energy-balance snow and ice melting model AMelt to reconstruct mass balance for Inner Tian-Shan glaciers

Rets E.P.¹, Petrakov D.A.², Shpuntova A.M.²

¹Water Problems Institute Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation

*²Department of Geography, Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russian Federation
retska@mail.ru*

Abstract: The impossibility of covering a large number of glaciers by mass-balance observations dictates the need for developing alternative methods for estimating the balance. The energy-balance physically-based snow and ice melting model with distributed parameters AMelt was used for the reconstruction of Sary-Tor and No. 354 glaciers mass-balance, located within the Ak-Shyrak massif, the inner Tien Shan, for 2004-2015. The verification of the results showed a good reproduction of direct measurements and reduction of the glaciers surface according to remote sensing by the model.

Keywords: Glacier mass-balance modelling, physically-based energy-balance model of snow and ice melting AMelt, Sary-Tor glacier, No.354 glacier, Tian-Shan