

СНЕЖНЫЙ ПОКРОВ И ЛЕДНИКИ

УДК 910.3

DOI: 10.21782/KZ1560-7496-2019-3(13-24)

ОЦЕНКА АЛЬБЕДО ЛЕДНИКОВ МАССИВА АК-ШИЙРАК (ТЯНЬ-ШАНЬ)
ПО НАЗЕМНЫМ ДАННЫМ И СНИМКАМ СО СПУТНИКОВ LANDSATД.А. Петраков¹, О.В. Тутубалина¹, А.М. Шпунтова¹, Н.В. Коваленко¹, Р.А. Усубалиев²,
Э.А. Азисов², П.Г. Михайлокова¹¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический ф-т,
119991, Москва, Ленинские горы, 1, Россия; dpetrakov@gmail.com²Центрально-Азиатский институт прикладных исследований Земли,
720027, Бишкек, ул. Тимура Фрунзе, 73/2, Кыргызская Республика

Приводятся и обсуждаются результаты наземных измерений и дистанционных оценок альbedo ледников массива Ак-Шийрак (Внутренний Тянь-Шань). Тенденция понижения альbedo, характерная для многих горно-ледниковых районов, способствует ускорению деградации ледников. В массиве Ак-Шийрак ситуация осложняется техногенным запылением, вклад которого в изменение альbedo был неизвестен. Наземные измерения альbedo производились летом в 2015–2016 гг. альбедометром Sp Lite2 производства фирмы Kipp&Zonen на 11 ледниках. На основе данных с двух ледников разработана модель, учитывающая наземную коррекцию значений альbedo, полученных по космическим данным. Для оценки альbedo ледников массива Ак-Шийрак по погодным условиям было отобрано 27 снимков Landsat. В отличие от ряда горных районов, уменьшения среднего альbedo ледников массива Ак-Шийрак вне горных разработок с 1990-х гг. не произошло. Альbedo поверхности ледников массива Ак-Шийрак детерминировано природными факторами, главным образом метеоусловиями предшествующего периода, наличием снегопадов и абсолютной высотой, влияющей на таяние снега. Техногенное воздействие горных разработок прослеживается локально, в виде механического нарушения ледников в районе рудника Кумтор, в то же время техногенное запыление на фоне природного по снимкам со спутников Landsat на ледниках массива Ак-Шийрак не прослеживается.

Альbedo, горные ледники, Тянь-Шань, массив Ак-Шийрак, техногенное воздействие

ASSESSMENT OF GLACIER ALBEDO IN THE AK-SHYIRAK MOUNTAINS (INNER TIEN SHAN)
FROM GROUND-BASED AND LANDSAT DATAD.A. Petrakov¹, O.V. Tutubalina¹, A.M. Shpuntova¹, N.V. Kovalenko¹, R.A. Usubaliev²,
E.A. Azisov², P.G. Mikhailukova¹¹Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, 1, Leninskie Gory, Moscow, 119991, Russia; dpetrakov@gmail.com²Central-Asian Institute for Applied Geosciences, 73/2, Timur Frunze str., Bishkek, 720027, Kyrgyz Republic

In the paper we present and discuss results of ground-based measurements and remote assessments of glacier albedo in the Ak-Shyirak massif (Inner Tien Shan). Tendencies of decreasing albedo are typical for many glacierized mountain regions and lead to accelerated glacier downwasting. In the Ak-Shyirak massif the situation is complicated by technogenic dust pollution, whose contribution to albedo changes was unknown. Ground-based albedo measurements were carried out across 11 glaciers during summers 2015 and 2016 using Sp Lite 2 Kipp&Zonen albedometer. On the basis of ground albedo measurements of two glaciers we developed a model to correct albedo values obtained from satellite imagery. 27 images from Landsat satellites were selected to assess glacier albedo in the Ak-Shyirak massif by weather conditions. In comparison to some other mountain regions we do not observe a decrease of glacier albedo in the Ak-Shyirak massif since 1990s. Glacier albedo in the Ak-Shyirak massif is driven by environmental factors, mostly by weather conditions prior to satellite survey, especially snowfalls, and elevation driving the snow melting. Technogenic impact (mechanical disturbance of glaciers within the Kumtor mine) is detected only locally, while technogenic dust on the background of natural dust is not traceable, with imagery from Landsat satellites, on glaciers across the Ak-Shyirak massif.

Albedo, mountain glaciers, Tien Shan, Ak-Shyirak massif, technogenic impact

ВВЕДЕНИЕ

Альbedo характеризует отражательную способность объектов земной поверхности в широком (видимом либо видимом и ближнем инфракрас-

ном) спектральном диапазоне при разных углах наблюдения и относится к важным параметрам, которые используются в климатических исследо-

ваниях, при оценке энергетического бюджета Земли, переноса радиации в системе Земля–атмосфера, а также при анализе компонентов энергетического баланса для континентальных ледников [Franch et al., 2014]. В летнее время альbedo поверхности ледников является одним из главных факторов, влияющих на интенсивность таяния снега и льда. Параметризация или оценка альbedo широко используется для моделирования баланса массы ледников.

Отражательная способность снежно-ледниковых поверхностей подвержена сильным пространственно-временным колебаниям [Dumont et al., 2011] и зависит от свойств льда и снега, шероховатости поверхности, распределения, типа и количества включений, содержания воды, характеристик радиационного потока [Warren, 1982; Aoki et al., 2007; Jin et al., 2008; Dozier et al., 2009].

Значения альbedo меняются в диапазоне от 0 до 1 и для свежего снега обычно достигают 0,9, а для грязного льда – 0,2 [Warren, 1982; Oerlemans, Knap, 1998] и ниже [Коновалов, 1985; Brock et al., 2000]. Кроме того, в последние годы в целом ряде горно-ледниковых систем мира отмечено снижение отражательной способности из-за роста загрязненности поверхности ледников [Naegeli et al., 2017].

Для ледников Тянь-Шаня характерно высокое природное запыление поверхности и, следовательно, низкое значение альbedo льда [Коновалов, 1985]. Высокая степень запыления ледников связана с эоловым переносом пыли из пустынь и полупустынь Центральной Азии. В весенне-осенний период эмиссия пыли наиболее активна в пустыне Такла-Макан, в летний – в пустынях Кара-Кум, Кызыл-Кум, Моюн-Кум. Еще в XIX в. было отмечено, что в летнее время для массива Ак-Шийрак характерно явление пыльной мглы, формирующееся в связи с усилением западного ветра [Каульбарс, 1875] и поступлением материала с пустынных пространств.

Другим источником пыли являются незадернованные поверхности, расположенные в непосредственной близости от ледников – склоны долин, частично задернованные поверхности сыртов. По данным М.А. Глазовской [1952], крутые склоны, обрамляющие ледник, поставляют основное количество пыли в результате физического выветривания.

В массиве Ак-Шийрак ситуация осложняется техногенным воздействием на ледники золотодобывающей компании Кумтор Голд Компани (КГК). Прямое воздействие заключается в механическом перемещении льда ледника Давыдова [Торгоев, 2017; Petrakov et al., 2016], непрямо – в эмиссии пыли при горнодобывающих работах, оцениваемой в 3–4 т ежедневно [Торгоев, Алешин, 2001]. По мнению некоторых исследователей, вы-

бросы пыли способствуют уменьшению альbedo и увеличению таяния [Торгоев, 2017; Kronenberg, 2013]. Реальный вклад КГК в запыление поверхности ледников до недавнего времени был неизвестен, и судя по детальным анализам концентрации пыли в воздухе [Кузьмиченко, 2012] и отсутствию зависимости темпов сокращения ледников от расстояния до карьера [Petrakov et al., 2016], был весьма невелик. В то же время И.А. Торгоев [2017], базируясь на данных 2009 г., делает однозначное заключение о том, что естественная пылевая загрязненность поверхности ледников в районе Кумторского рудника увеличивается за счет кумулятивного многолетнего запыления, вызванного операционной деятельностью КГК.

В настоящее время разработаны способы наземной и дистанционной оценки альbedo поверхности, при этом результаты, полученные в ходе наземных измерений и дистанционным путем, обычно несколько различаются [Knap et al., 1999; Lucht et al., 2000]. Считается, что для корректной оценки альbedo по спутниковым данным требуется наземная валидация [Liang, 2001; Liang et al., 2003]. При наземной альbedосъемке на больших территориях часто отмечаются вариации альbedo, вызванные изменением состояния поверхности. Другим недостатком наземных измерений является ограниченность выборки точек как в пространстве, так и во времени. Для исключения влияния на оценку альbedo факторов разновременности и пространственно-временной ограниченности данных следует использовать оценки альbedo на основе космических снимков. Кроме того, наземная валидация приводит к росту достоверности оценки альbedo на основе спутниковых данных.

Цель исследования – оценка альbedo ледников массива Ак-Шийрак по наземным данным и космическим снимкам со спутников Landsat. Для ее достижения был решен ряд задач: подбор, получение и обработка многозональных космических снимков со спутников Landsat с начала 1990-х гг. до 2016 г. на территорию массива Ак-Шийрак; проведение наземных измерений альbedo на ряде ледников в 2015–2016 гг.; оценка альbedo по спутниковым данным на основе известных алгоритмов; верификация спутникового альbedo на базе наземных измерений; оценка вклада рудника Кумтор в пылевое загрязнение ледников массива Ак-Шийрак посредством пространственно-временного анализа альbedo.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Наземные измерения альbedo

Для проведения наземной альbedосъемки использовался альбедометр SP Lite2 производства фирмы Kipp&Zonen, состоящий из двух одно-

именных пиранометров. SP Lite2 сконструирован специально для проведения полевых альбедосъемок [The Eppley Laboratory, 2018; Solar..., 2018]. Его отличительные качества – небольшая масса (0.32 кг), устойчивость к внешним воздействиям (силиконовая полусфера вместо стеклянной), возможность работы как в постоянном режиме с заданной частотой измерений, так и при включениях/выключениях. Альбедометр комплектуется двумя логгерами Meteor, позволяющими записывать данные и(или) считывать их на экране дисплеев, и держателем длиной 0.3 м. По сравнению с другими альбедометрами SP Lite2 отличается очень коротким временем отклика (менее 500 нс) и высокой точностью. Короткое время отклика, малая масса прибора и наличие уровня минимизируют ошибки, связанные с некорректным горизонтированием прибора. Погрешность на нелинейность составляет менее 1 % при радиации от 0 до 1 кВт/м², температурная зависимость – 0.15 %/°C в диапазоне от –30 до +70 °C, погрешность за нестабильность прибора – менее 2 % в год [SP Lite2, 2015]. В нашем случае все измерения производились в течение 1.5 месяцев (т. е. погрешность за нестабильность отсутствовала) и в схожем диапазоне температур (температурная зависимость была минимальной). Максимальная погрешность измерений (по данным производителя) составляет 3 % [SP Lite2, 2015]. В наших условиях, т. е. при съемке в течение коротких интервалов времени в диапазоне температур от 0 до +10 °C, погрешность

измерений уменьшается до 1.5 %. Следует отметить, что более точные альбедометры можно использовать только при стационарных наблюдениях на метеостанциях. Как альбедометр, так и логгеры были калиброваны в лаборатории производителя.

Увеличение запыления поверхности ледников непосредственно отражается на альbedo, или отражающей способности, поверхности ледников, поэтому летом 2015 г. на семи ледниках массива Ак-Шийрак и хр. Джетимбель были проведены площадные и маршрутные альбедосъемки. При этом предполагалось, что степень воздействия центрального карьера компании Кумтор, дающего основную долю выбросов пыли [Торгоев, 2017], зависит от расстояния до него. Для работ были выбраны ледники Сары-Тор, Лысый, Петрова, № 354 (Борду Южный), № 27 в бассейне р. Тез, Западный Суёк и № 434, расположенные на расстоянии от 3 до 37 км от центрального карьера. В 2016 г. были произведены измерения на ледниках в различных районах Кыргызстана: Киргизский хребет (ледники Адыгене, Голубина), Алайский хребет (ледник Абрамова), хр. Кюнгей Ала-Тоо (ледник № 599), хр. Джетимбель (ледник Западный Суёк) и массив Ак-Шийрак (ледник № 354). Главной задачей этих работ стал поиск связей между значениями альbedo, полученными на основе наземных и спутниковых оценок. Положение ледников, на которых проводилась наземная альбедосъемка в 2015 и 2016 гг., показано на рис. 1. При маршрут-

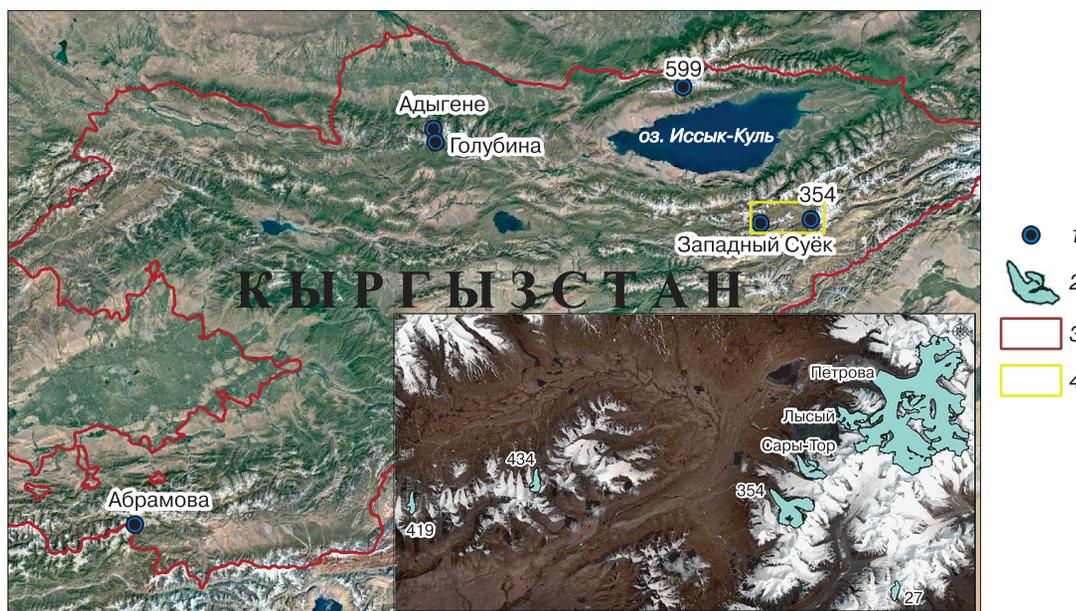


Рис. 1. Расположение районов и точек наземной альбедосъемки ледников Кыргызстана в 2015–2016 гг.

1, 2 – ледники, на которых производились наземные измерения альbedo в 2016 и 2017 гг. соответственно; 3 – граница Кыргызской Республики; 4 – положение детальной врезки. На врезке – участки массива Ак-Шийрак и хр. Джетимбель с ледниками, на которых производились наземные измерения.

Таблица 1. Характеристика данных наземной альбедосъемки 2015–2016 гг.

Ледник и номер	Количество измерений альbedo	Облачность	Дата съемки	Расстояние до карьера от центра ледника, км	Сред. арифметич. значение альbedo льда	Среднее квадратич. отклонение
27	56	Переменная	12.08.2015	15.6	0.18	0.03
354	91	»	13.08.2015	7.2	0.17	0.05
354	209	»	20, 22.07.2016	7.2	0.24	0.07
434	68	Ясно	14.08.2015	26.0	0.16	0.04
599	50	Переменная	14.08.2016	145	0.23	0.06
Абрамова	78	Ясно	02.08.2016	600	0.13	0.04
Адыгене	121	»	10–11.07.2016	325	Н/д	Н/д
Голубина	98	»	28.08.2016	315	0.18	0.09
Западный Суёк (419)	70	Переменная	14.08.2015	37.2	0.16	0.03
Западный Суёк (419)	81	»	16–17.08.2016	37.2	0.20	0.04
Лысый	130	»	06.08.2015	3.4	0.18	0.05
Петрова	49	»	07.08.2015	8.2	0.16	0.04
Сары-Тор	194	»	05.08.2015	3.2	0.17	0.06

Примечание. Н/д – нет данных, ледник был покрыт снегом.

Таблица 2. Космические снимки со спутников Landsat, использованные для оценки альbedo ледников массива Ак-Шийрак

Номер	ID снимка	Дата съемки	Среднее альbedo	δ^*
1	LT51480311991263	20.09.1991	0.60	9.4
2	LT51480311993268	25.09.1993	0.55	4.7
3	LT51480311997199	18.07.1997	0.32	0.1
4	LT51480311998234	22.08.1998	0.53	14.4
5	LE71480311999197	16.07.1999	0.37	105.7
6	LE71480311999261	18.09.1999	0.37	22.8
7	LE71480312001250	07.09.2001	0.58	7.2
8	LE71480312002205	24.07.2002	0.48	1.8
9	LE71480312002237	25.08.2002	0.31	0.0
10	LT51480312006224	12.08.2006	0.32	0.03
11	LT51480312006256	13.09.2006	0.52	2.1
12	LT51480312007195	14.07.2007	0.57	33.0
13	LT51480312007211	30.07.2007	0.41	1.9
14	LT51480312007259	16.09.2007	0.36	0.02
15	LT51480312008166	14.06.2008	0.47	1.4
16	LT51480312009136	16.05.2009	0.61	82.5
17	LT51480312010251	08.09.2010	0.46	4.2
18	LT51480312011254	11.09.2011	0.58	8.9
19	LC81480312013211	30.07.2013	0.33	0.1
20	LC81480312013243	31.08.2013	0.57	2.3
21	LC81480312013275	02.10.2013	0.50	0.07
22	LC81480312014134	14.05.2014	0.49	0.07
23	LC81480312014182	01.07.2014	0.39	0.2
24	LC81480312015169	18.06.2015	0.61	0.01
25	LC81480312015185	04.07.2015	0.48	0.8
26	LC81480312015233	21.08.2015	0.30	1.2
27	LC81480312016172	20.06.2016	0.57	0.09

* Доля бракованных пикселей от числа корректных, %.

ных работах авторы старались максимально полно охватить нижние части ледников для получения представительной статистики по поверхности льда. Сведения о датах измерений, количестве промерных пунктов, погоде приведены в табл. 1. Во всех случаях отмечается нормальное распределение значений альbedo льда, отличия средних арифметических значений от медианных не превышают 0.01.

Координаты всех точек альбедосъемки фиксировались при помощи портативного GPS-приемника Garmin 70 csx. Для каждой точки при съемке фиксировался тип поверхности – лед (грязный, загрязненный или чистый), наложенный лед, фирн, снег и свежевывающий снег.

В 2015 г. на ледниках Сары-Тор и Лысый была проведена нерегулярная площадная съемка, для остальных ледников она носила маршрутный характер. Всего было сделано 658 измерений альbedo, расположенных в 530 маршрутных точках. В 2016 г. на ледниках было сделано 637 измерений альbedo в 603 точках по системе маршрутов на ледниках. Несколько измерений в одной маршрутной точке производилось при значительных отличиях альbedo на расстоянии до 2–3 м от точки. В этом случае для дальнейших оценок использовалось среднее арифметическое значение альbedo.

Расчет значений альbedo по космическим снимкам

На основе космических снимков TM/Landsat-5, ETM+/Landsat-7, OLI/Landsat-8, полученных в летние периоды 1990–2016 гг., выполнены оценка альbedo и анализ его пространственного распределения. Эта работа проведена на основании 27 снимков на массив Ак-Шийрак (табл. 2),

Таблица 3. Формулы для расчета значений альbedo по снимкам со спутников Landsat

Но- мер	Формула альbedo (b_n – n -я спектральная зона съемочной системы)*		Источник
	Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+	Адаптация для Landsat-8 OLI	
(1)	$0.443b_1 + 0.317b_2 + 0.240b_3$	$0.443b_2 + 0.317b_3 + 0.240b_4$	[Liang, 2001]
(2)	$0.526 \cdot 1.12b_4 + 0.232b_4 + 0.130 \cdot 0.63b_4 + 0.112b_7$	$0.526 \cdot 1.12b_5 + 0.232b_5 + 0.130 \cdot 0.63b_5 + 0.112b_7$	[Duguay, LeDrew, 1992]
(3)	$0.493b_2 + 0.203b_4 + 0.150b_5 + 0.154b_7$	$0.493b_3 + 0.203b_5 + 0.150b_6 + 0.154b_7$	[Brest, Goward, 1987]
(4)	$0.782b_4 + 0.148b_4^2$	$0.782b_5 + 0.148b_5^2$	[Knap et al., 1999]

* Участки электромагнитного спектра для систем Landsat-5 TM, Landsat-7 ETM+: b_1 – голубой, b_2 – зеленый, b_3 – красный, b_4 – ближний инфракрасный, b_5, b_7 – средние инфракрасные; для Landsat-8 OLI: b_2 – голубой, b_3 – зеленый, b_4 – красный, b_5 – ближний инфракрасный, b_6, b_7 – средние инфракрасные.

выбранных более чем из 200 снимков. Все отобранные снимки удовлетворяли следующим условиям: съемка в теплое время года, хорошая погода в момент проведения съемки (минимальная облачность или ее отсутствие), минимальное покрытие ледников свежеснеженным снегом. При наличии свежеснеженного снега на языках ледников снимки заведомо отбраковывались. Кроме того, в качестве вспомогательных (для калибровки спутникового альbedo) были использованы снимки для ледников Абрамова, Адыгене и Голубина, полученные летом 2016 г. синхронно с датами наземных измерений.

Все снимки прошли процедуру атмосферной коррекции по методам Геологической службы США [USGS, 2018] и были приведены к значениям коэффициентов спектральной яркости земной поверхности (surface reflectance).

В методике оценки альbedo ледников на основе космических снимков со спутников Landsat выделяется два этапа:

1) выбор оптимального алгоритма расчета альbedo по многозональным космическим снимкам со спутников серии Landsat;

2) калибровка выбранного алгоритма по наземным данным.

Для выбора оптимального алгоритма расчета альbedo был проанализирован ряд эмпирических формул для оценки интегрального значения альbedo льда и снега по многозональным снимкам со спутников Landsat. Формулы приведены в табл. 3.

Анализ табл. 3 совместно с параметрами охвата спектральных зон для снимков со спутников Landsat [What are the band..., 2018] показывает, что в формуле (1) [Liang, 2001] использованы коэффициенты спектральной яркости в видимом диапазоне, для которого характерна засветка (аномально высокие значения коэффициента спектральной яркости). При этом экспериментальные расчеты по формуле (3) [Brest, Goward, 1987], включающей, с наибольшим весом, зеленую спектральную зону видимого диапазона, также показали сильное влияние засветки. Включение в расчет значений яркости в ближнем и среднем ин-

фракрасном спектрах позволяет минимизировать влияние засветки на точность вычисления значений альbedo (формулы (2)–(4)), поэтому в дальнейшем использовались только формулы (2) и (4) (см. табл. 3).

Значения альbedo по приведенным формулам рассчитывались в программном пакете ERDAS Imagine 2016.

Для выбора оптимальной формулы и калибровки соответствующего алгоритма рассчитанные по космическим снимкам OLI/Landsat-8 значения альbedo сопоставлялись с наземными измерениями.

Принципы сопоставления данных и их коррекции

Быстрая изменчивость альbedo даже в условиях относительно однородной погоды [Knap et al., 1999] заставляет строго подходить к использованию наземных данных для верификации спутниковых данных и не допускать значительных отклонений в сроках наземной альbedосъемки и пролета спутника. Идеально производить замеры в момент пролета спутника с отклонением не более 3 ч от 12 часов астрономического времени [Knap et al., 1999; Pimentel et al., 2016]. При условии стабильной погоды (отсутствие снегопадов) и отсутствии процессов таяния/замерзания на поверхности ледника возможно проведение наземных измерений за несколько дней до или через несколько дней после пролета спутника, но время наземных измерений не должно отличаться от времени пролета спутника более чем на 3 ч [Knap et al., 1999].

С учетом летнего максимума осадков во Внутреннем Тянь-Шане для поиска зависимости между наземными и спутниковыми значениями альbedo удалось использовать ограниченное количество данных. В 2016 г. наземные измерения на ледниках Адыгене, Голубина (оба – Киргизский хребет) и Абрамова (Алайский хребет) выполнены при ясном небе в дни пролета спутника Landsat-8 над исследуемыми территориями. Следует отметить, что размер пиксела мультиспектрального изображения Landsat-8 OLI составляет 30 м, а погреш-

Таблица 4. **Итоги сопоставления наземного и спутникового альbedo на опорных ледниках Абрамова и Адыгене**

Ледник	Дата спутниковой съемки и наземных измерений	Тип поверхности	Кол-во измерений	Формула расчета альbedo	Кол-во измерений, по которым рассчитана регрессия*	Уравнение регрессии для расчета наземного альbedo**	Коэффициент детерминации (R^2)	Стандартная ошибка (σ)
Абрамова	03.08.2016	Лед	78	(2) [Duguay, LeDrew, 1992]	76	$0.913a + 0.03$	0.66	0.02
Адыгене	11.07.2016	Снег	122	(2) [Duguay, LeDrew, 1992] (4) [Knap et al., 1999]	87 89	$0.938a + 0.05$ $0.812a + 0.08$	0.75 0.72	0.05 0.05

* Исключены измерения с различием спутникового и наземного альbedo более 0.1.

** a – спутниковое альbedo.

ность географической привязки – 12 м [Storey et al., 2014]. Для сопоставления расчетных значений альbedo (см. табл. 3) и значений альbedo, полученных в ходе наземной съемки, использовались статистические методы. При расчете уравнений регрессии были взяты значения, для которых разность между наземными и полученными по спутниковым данным значениями альbedo составила менее 0.1. Точки наблюдений с большими разностями находились на краевых частях ледников, на участках резкого перехода (в пределах пиксела снимка) между высокими значениями альbedo льда и низкими значениями альbedo каменистых моренных отложений. Таким образом, эти краевые пиксели на снимках относятся к смешанным. На леднике Абрамова было отброшено 2 точки из 78, т. е. менее 3 %. Надо сказать, что в итоге уравнения именно по этому леднику использовались для калибровки спутниковых оценок альbedo. На леднике Адыгене было отброшено 32–34 точки из 121 (в зависимости от уравнения), т. е. около 28 %. В пределах же основной площади ледников все расхождения составили менее 0.1 (что подтверждает правомерность сравнения наземных измерений и спутниковых оценок альbedo на однородных территориях).

Корреляция рассчитанных по формуле (1) [Liang, 2001] (см. табл. 3) значений альbedo с измеренными на леднике Голубина не оказалась высокой. Это связано с тем, что поверхность ледника Голубина в день проведения измерений (28 августа 2016 г.) была неоднородной – пятна открытого льда чередовались со свежим снегом.

В нашем случае условиям стабильной погоды удовлетворяли два ледника – Абрамова и Адыгене. В условиях идеально ясной погоды получены качественные космические снимки. Теплая антициклональная погода приводила к отсутствию ночного заморозания или ночных осадков и, соответственно, к достаточно однородной поверхности.

Таким образом, в итоговом статистическом анализе были использованы измерения, произведенные на ледниках Абрамова (измерения на по-

верхности льда) и Адыгене (на поверхности снега). Сводная информация представлена в табл. 4.

Расчеты по формуле (2) [Duguay, LeDrew, 1992] проведены для обоих ледников, а по формуле (4) [Knap et al., 1999] только для заснеженного ледника Адыгене, чтобы оценить, не повысит ли эта формула точность оценок альbedo, уменьшая проблему засветки.

Корреляция между значениями альbedo, рассчитанными по формуле (4) и измеренными, оказалась чуть слабее, чем корреляция между значениями альbedo, рассчитанными по формуле (2) и измеренными. Поэтому в качестве итоговой для расчета значений альbedo была принята формула (2) [Duguay, LeDrew, 1992], оперирующая альbedo только ближней инфракрасной зоны (в которой все же, по результатам экспериментов, отмечается частичная засветка изображений, полученных со спутников TM/Landsat-5 и ETM+/Landsat-7).

Для калибровки значений спутникового альbedo по наземным данным было взято выведенное авторами эмпирическое уравнение линейной регрессии для спутниковых и наземных измерений по леднику Абрамова как имеющее наименьшие погрешности:

$$a_{\text{назем}} = 0.913a_{\text{спут}} + 0.03,$$

где $a_{\text{спут}}$ рассчитано по формуле из [Duguay, LeDrew, 1992].

Таким образом, совокупность расчета альbedo по формуле (2) [Duguay, LeDrew, 1992] и выполненной коррекции по эмпирическому уравнению на основе наземных измерений альbedo составляет, по данным авторов, наиболее точную современную модель для оценки альbedo снега и льда массива Ак-Шийрак по снимкам со спутников Landsat.

На основе выбранных формул расчета альbedo по уравнениям (2) (см. табл. 3) и эмпирического уравнения регрессии по наземным данным для ледника Абрамова (см. табл. 4) были обработаны все космические снимки массива Ак-Шийрак со спутников Landsat за 1990–2016 гг.

Дополнительно была предпринята попытка топографической нормализации получаемых значений альbedo для учета неравномерного освещения рельефа солнечными лучами. Однако на топо-нормализованных изображениях были обнаружены многочисленные артефакты, связанные с неточностями ASTER Global DEM 2 на высокогорных участках. Поэтому от использования топо-нормализованных значений альbedo решено отказаться.

Для создания карт альbedo ледников массива Ак-Шийрак значения альbedo рассчитывались и визуализировались в пределах границ ледников 2013 г. [Petrakov et al., 2016] для снимков начиная с 2008 г. и в пределах границ 2003 г. для более старых снимков. Для исключения облачных участков на снимки была наложена маска облаков, которая поставляется вместе со снимками, прошедшими атмосферную коррекцию, а в случае ее низкого качества производилась ручная оцифровка облаков.

АНАЛИЗ ЗНАЧЕНИЙ АЛЬБЕДО

Результаты наземной оценки альbedo

На основе наземных измерений 2015 г. проведен анализ пространственного распределения значений альbedo для ледников Сары-Тор и Лысый. На остальных ледниках съемка не носила площадной характер, поэтому авторы ограничились сравнением средних значений альbedo льда и снега, полученных по каждому леднику путем подсчета среднеарифметической величины. Следует отметить, что вариация значений альbedo как льда, так и снега в пределах маршрутов невелика (см. табл. 1).

Для ледника Сары-Тор (рис. 2) не выявлено существенных закономерностей в распределении

значений альbedo льда: ареалы пониженной отражательной способности поверхности льда отмечаются как в нижней части языка, так и в верхней части, близ границы области питания. При этом в верхней части наблюдается обширная область пониженных значений альbedo. Районы повышенных значений приурочены к участкам снега и на-течного льда. Схожая картина наблюдается и при картографировании альbedo методом изолиний с шагом 0.05.

Распределение значений альbedo на леднике Лысый (рис. 3) отличается от ситуации на леднике Сары-Тор, значения в целом выше. Минимальная отражательная способность отмечается на высотах 4100–4400 м в орографически правой части ледника. Ареал пониженного альbedo, вероятно, связан с близостью к выветрелому склону с большим количеством мелкозема и пыли на поверхности. Так же как и на Сары-Тор, на языке ледника Лысый в средней части протянулась узкая полоса повышенных значений альbedo. По-видимому, это связано с большим удалением от склонов или с выходом на поверхность более чистого льда.

На остальных ледниках массива Ак-Шийрак среднее альbedo льда в 2015 г. также оказалось низким и варьировало от 0.16 на леднике Западный Суёк до 0.18 на ледниках Лысый и № 27 (см. табл. 1). Уменьшения среднего альbedo льда на ледниках по мере приближения к центральному карьеру КГК не происходит, это говорит о том, что техногенное запыление поверхности ледников не проявляется на природном фоне. Все изменения среднего альbedo льда изучаемых ледников находятся в пределах погрешности прибора.

По результатам наземных измерений в 2016 г. среднее значение альbedo 0.13 на языке ледника

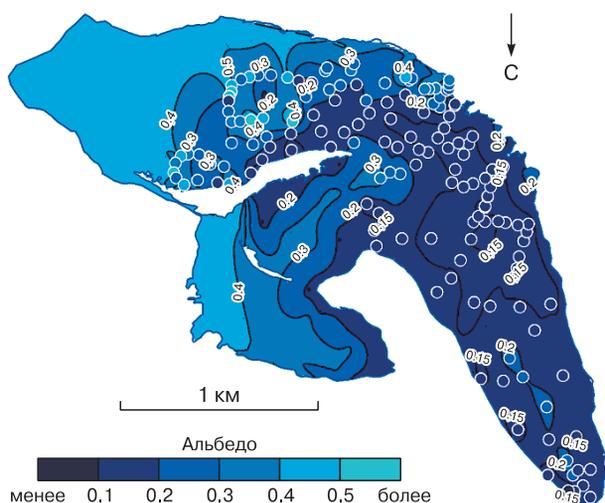


Рис. 2. Распределение значений альbedo на леднике Сары-Тор массива Ак-Шийрак по данным наземных измерений (точки), 05.08.2015 г.

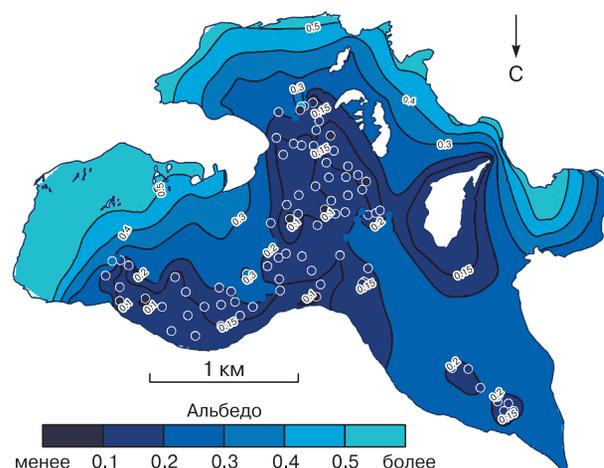


Рис. 3. Распределение значений альbedo на леднике Лысый массива Ак-Шийрак по данным наземных измерений (точки), 06.08.2015 г.

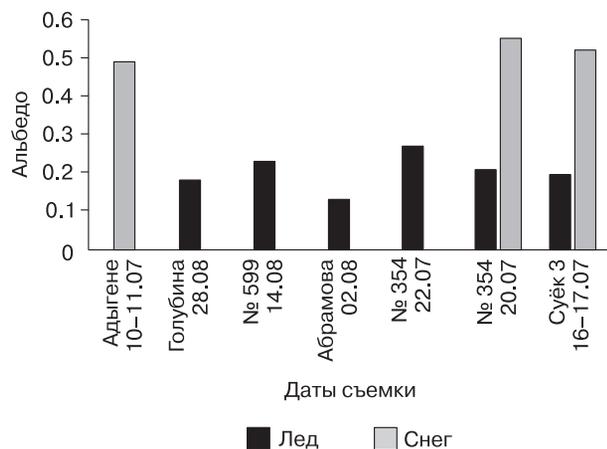


Рис. 4. Средние значения альbedo снега и льда на обследованных ледниках Кыргызстана в 2016 г.

Абрамова площадью около 2 км² оказалось существенно ниже средних значений альbedo льда других ледников, измерения на которых производились в 2015 и 2016 гг. (рис. 4, табл. 1). Вероятно, это обусловлено длительным отсутствием снегопадов за период до альbedосъемки и близостью Ферганской долины, которая может являться дополнительным источником пыли.

Среднее значение альbedo 0.18 для ледника Голубина оказалось несколько выше, чем для ледника Абрамова, но ниже, чем для остальных.

Для ледника № 599 статистически значимая выборка была также получена только для льда. Среднее значение альbedo льда для № 599 равно 0.23, а для ледника № 354 составляет 0.24. Следует отметить, что всего за два дня произошло существенное (с 0.21 до 0.27) изменение альbedo льда на леднике № 354. Оно объясняется частичным замерзанием воды на поверхности ледника в ночное время.

Результаты дистанционной оценки альbedo

По всем используемым снимкам со спутников Landsat были построены карты альbedo на всю площадь оледенения массива Ак-Шийрак. Примеры подобных карт приведены на рис. 5.

Распределение альbedo ледников в массиве Ак-Шийрак связано прежде всего с наличием или отсутствием снежного покрова, которое, в свою очередь, связано с абсолютной высотой местности. Наиболее низкие значения альbedo отмечаются на гипсометрически низко расположенных языках крупных ледников Петрова, Джаман-Су, Северный Карасай и др.

Для проверки предположения о влиянии техногенного запыления на альbedo поверхности ледников по каждому снимку были построены графики зависимости альbedo от расстояния до центрального карьера. Каждая точка на графике явля-

лась одним из более чем 400 тыс. пиксел снимка Landsat и характеризовалась значением альbedo и удалением от центрального карьера. Очевидно, при выраженном техногенном воздействии будет наблюдаться тесная связь между альbedo и расстоянием до карьера: чем ближе расстояние, тем ниже альbedo. В большинстве случаев зависимость отсутствует, коэффициент корреляции приближается к нулю. Более того, лишь в 2 случаях из 27 отмечены положительные значения коэффициента корреляции R , позволяющие говорить об очень слабой связи между значениями альbedo и удаленностью от центрального карьера. В 13 случаях из 27 значения коэффициента корреляции отрицательны, что свидетельствует об очень слабой обратной связи между значениями альbedo поверхности ледников и расстоянием до центрального карьера, т. е. о росте альbedo по мере приближения к центральному карьере. Теснота обратных связей несколько выше тесноты прямых, а количество снимков с обратными связями в 6.5 раза превышает количество снимков с прямыми связями. Такая статистика позволяет уверенно говорить об отсутствии тенденции понижения альbedo поверхности ледников массива Ак-Шийрак по мере приближения к центральному карьере компании.

Средние значения альbedo поверхности ледников в массиве Ак-Шийрак определялись по каждому снимку. В результате был получен большой разброс значений альbedo (см. табл. 2), обусловленный наличием или отсутствием свежевыпавшего или весеннего снега на ледниках массива. Более низкие значения альbedo закономерно отмечаются в июле–августе и начале сентября, более высокие – в мае–июне и во второй половине сентября. Не выявлено уменьшения альbedo поверхности ледников в последние годы, отмечавшегося ранее в Альпах [Brock et al., 2000; Oerlemans et al., 2009], в Гренландии [As et al., 2012] и на Тибете [Fujita, Ageta, 2000; Fujita, 2008a,b; Li et al., 2011; Wu et al., 2015]. Отсутствие такой тенденции на Тянь-Шане может объясняться как неоднородностью и недостаточностью выборки снимков, так и эффектом “высокой базы”: количество летних осадков в 1990-х гг. было ниже среднего, что способствовало более высокому запылению поверхности. Кумулятивного эффекта запыления поверхности ледников в целом по массиву Ак-Шийрак также не прослеживается [Торгоев, 2017]. Данный вывод подтверждается сопоставлением независимых оценок эмиссии пыли предприятием, составляющих 3–4 т/сут [Торгоев, Алешин, 2001; Торгоев, 2017], или 1000 т/год, и олового привноса в нивально-гляциальную зону Тянь-Шаня, оцениваемого в 1 м³/1000 лет [Степанов, 1961], или 1000 м³/км² в год. Локального воздействия эмиссии пыли рудником Кумтор исключить нельзя.

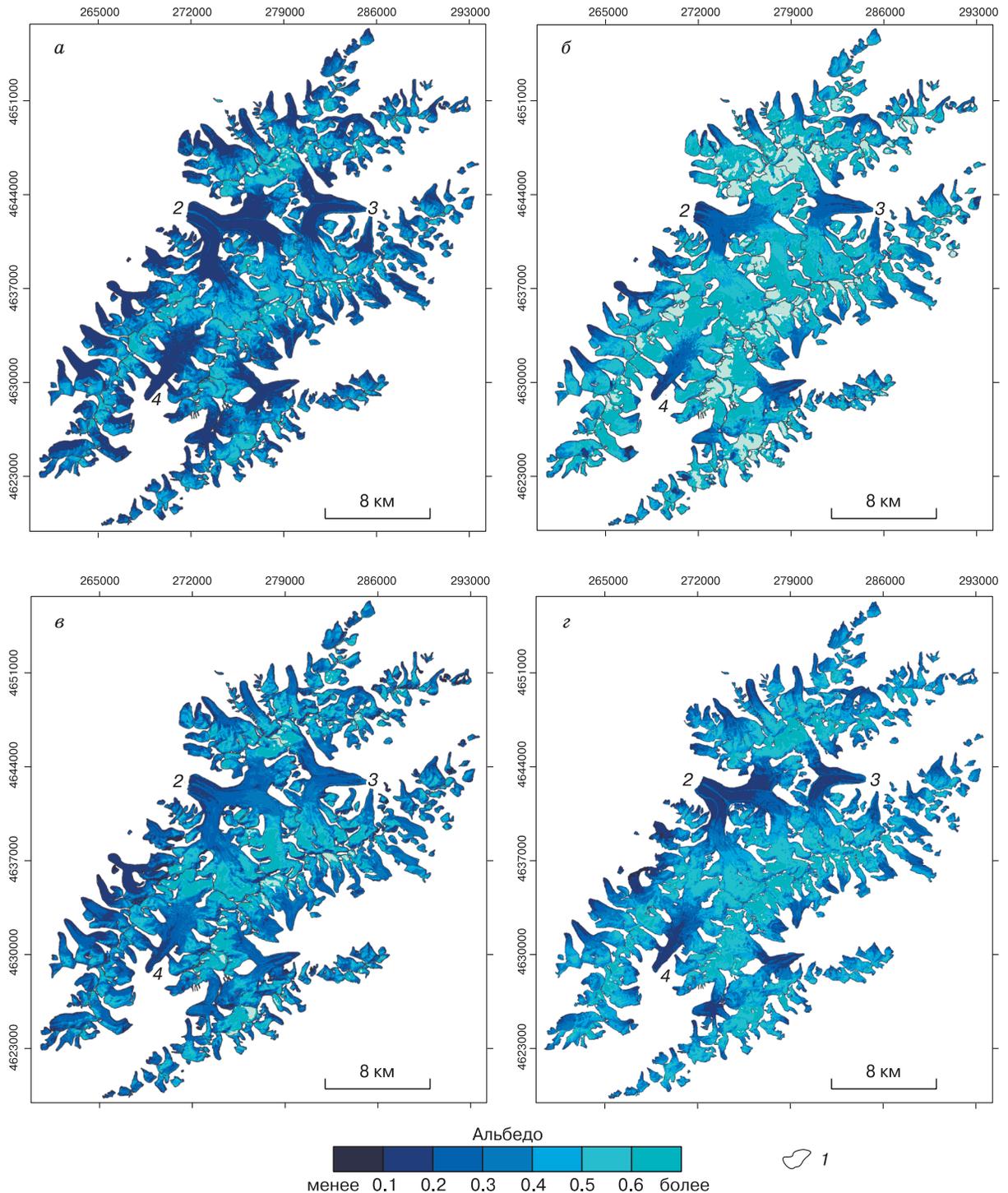


Рис. 5. Карты альbedo массива Ак-Шийрак, составленные по снимкам со спутников Landsat в разные годы.

a – Landsat-5 TM, 04.09.1997; *б* – Landsat-7 ETM+, 24.07.2002; *в* – Landsat-5 TM, 16.09.2007; *г* – Landsat-8 OLI, 01.07.2014. 1 – контуры ледников; 2 – ледник Петрова; 3 – ледник Джаман-Су; 4 – ледник Северный Карасай. Рисунок выполнен в системе координат UTM (Universal Transverse Mercator).

ВЫВОДЫ

Оценка альbedo поверхности ледников в массиве Ак-Шийрак выполнена на основе наземных и спутниковых данных. Летом 2015 г. были произведены полевые измерения альbedo на 5 ледниках массива и 2 ледниках в непосредственной близости от него. Во всех случаях среднее альbedo льда варьировало в диапазоне 0.16–0.18. Вследствие неустойчивой погоды в дни измерений связь со спутниковыми значениями альbedo получить не удалось. Летом 2016 г. были проведены дополнительные полевые измерения альbedo на 6 ледниках Кыргызстана, в двух случаях даты наземных измерений при хорошей погоде совпали с датой пролета спутника. Проанализированы существующие алгоритмы оценки альbedo на основе снимков со спутников Landsat (после приведения к коэффициентам спектральной яркости поверхности Земли). Выбор спутника был основан на разрешении снимков 30 м/пиксел и рекомендациях по использованию именно снимков со спутников Landsat для оценки радиометрических свойств поверхности горных ледников [Pope, Rees, 2014]. Наилучшие результаты дала формула расчета альbedo из [Duguay, LeDrew, 1992], показавшая тесную связь с наземными данными (коэффициент корреляции $R = 0.81$, стандартная ошибка $\sigma = 0.02$).

Авторами разработана модель, учитывающая наземную коррекцию значений альbedo, полученных по космическим данным. Проанализирован массив снимков со спутников Landsat (более 200), перекрывающих весь массив Ак-Шийрак, но по погодным условиям было отобрано только 27 снимков. На заключительном этапе на основе расчетов по отобраным снимкам оценено альbedo на всей площади оледенения массива Ак-Шийрак. На каждом из снимков альbedo оценивалось более чем в 400 тыс. точек, каждая из которых соответствовала одному пикселу снимка, или квадрату 30×30 м на местности.

В отличие от ряда горных районов, уменьшения среднего альbedo ледников массива Ак-Шийрак с 1990-х гг. не произошло. Альbedo поверхности ледников массива Ак-Шийрак детерминировано природными факторами, главным образом сезоном года, абсолютной высотой и метеоусловиями предшествующего периода. Связь между альbedo ледников, определенным по снимкам со спутников Landsat, и расстоянием до центрального карьера КГК отсутствует. Техногенное запыление ледников на фоне природного, в целом, в массиве Ак-Шийрак не прослеживается, хотя наблюдается локальное понижение альbedo в карьере КГК и на прилегающей территории вследствие перемещения льда, его перемешивания с пустой породой и перекрытия ею, а также из-за запыления в пределах карьера.

Авторы выражают искреннюю благодарность за логистическую поддержку при выполнении настоящего исследования Кумтор Голд Компани и лично Э.Т. Кожомкулову, С.С. Кутузову (ИГ РАН), В.В. Поповнину (МГУ), В.И. Шатравину и Р. Сатылканову (ИВП и ГЭ НАН Кыргызстана) за конструктивное обсуждение некоторых результатов, С.А. Ерохину (ИВП и ГЭ НАН Кыргызстана) за помощь при организации полевых работ на леднике Адыгене, М. Барандун, Т. Саксу, Х. Махмуту (Университет Фрибурга, Швейцария) за помощь при организации полевых работ на ледниках Западный Суёк, № 354, Абрамова и Голубина. Авторы благодарны анонимным рецензентам, чьи ценные замечания и предложения позволили существенно улучшить первоначальный вариант статьи.

Методика использования снимков Landsat для оценки альbedo разрабатывалась при поддержке РФФИ (проект № 18-05-00838). Исследования выполнены в рамках тем госзадания 1.5. “Изменение криосферы Земли под влиянием природных факторов и техногенеза” и 1.20 “Методы и технологии картографии, геоинформатики и аэрокосмического зондирования в исследованиях изменений природной среды и общества”.

Литература

- Глазовская М.А.** Эоловые мелкоземистые накопления на ледниках хребта Терской Ала-Тау // Тр. Ин-та географии АН СССР. М., 1952, 49 с.
- Каульбарс А.В.** Материалы по географии Тянь-Шаня, собранные во время путешествия // Записки РГО по общей географии, 1875, т. 5, с. 253–539.
- Коновалов В.Г.** Таяние снега и сток с ледников. Л., Гидрометеоиздат, 1985, 121 с.
- Кузьмиченко В.А.** Запыленность атмосферы и ледников в районе месторождения Кумтор (хр. Акшыйрак, Тянь-Шань) // Лед и снег, 2012, № 2, с. 131–140.
- Степанов И.Н.** Снежники Тянь-Шаня // Природа, 1961, № 1, с. 109–110.
- Торгов И.А.** Экология горнопромышленного комплекса Кыргызстана / И.А. Торгов, Ю.Г. Алешин. Бишкек, Илим, 2001, 239 с.
- Торгов И.А.** Ледники, золото и геоэкология Кумтора. Рига, Lambert Academic Publishing, 2017, 204 с.
- Aoki T., Motoyoshi H., Kodama Y. et al.** Variations of snow physical parameters and their effects on albedo in Sapporo, Japan // Ann. Glaciol., 2007, vol. 46, p. 375–281.
- As D.V., Hubbard A., Hasholt B. et al.** Large surface meltwater discharge from the Kangerlussuaq sector of the Greenland ice sheet during the recordwarm year 2010 explained by detailed energy balance observations // The Cryosphere, 2012, No. 6, p. 199–209.
- Brest C.L., Goward S.N.** Deriving surface albedo measurements from narrow band satellite data // Intern. J. Remote Sensing, 1987, No. 8 (3), p. 351–367.
- Brock B.W., Willis I.C., Sharp M.J.** Measurement and parameterization of albedo variations at Haut Glacier d’Arolla // Switzerland J. Glaciol., 2000, vol. 46, iss. 155, p. 675–688.
- Dozier J., Green R., Nolin A., Painter T.** Interpretation of snow properties from imaging spectrometry // Remote Sensing of Environ., 2009, vol. 113, p. S25–S37.

- Duguay C.R., LeDrew E.F.** Estimating surface reflectance and albedo over rugged terrain from Landsat-5 Thematic Mapper over Rugged Terrain // Photogrammetric Eng. and Remote Sensing, 1992, vol. 58, No. 5, p. 551–558.
- Dumont M., Durand Y., Arnaud Y., Six D.** Variational assimilation of albedo in a snowpack model and reconstruction of the spatial distribution of an alpine glacier // J. Glaciol., 2011, vol. 58, No. 207, p. 151–164.
- Franch B., Vermote E.F., Claverie M.** Intercomparison of Landsat albedo retrieval techniques and evaluation against in situ measurements across the US SURFRAD network // Remote Sensing of Environ., 2014, vol. 152, p. 627–637.
- Fujita K.** Influence of precipitation seasonality on glacier mass balance and its sensitivity to climate change // Ann. Glaciol., 2008a, vol. 48, p. 88–92.
- Fujita K.** Effect of precipitation seasonality on climatic sensitivity of glacier mass balance // Earth and Planet. Sci. Lett., 2008b, vol. 276, No. 1–2, p. 14–19.
- Fujita K., Ageta Y.** Effect of summer accumulation on glacier mass balance on the Tibetan Plateau revealed by mass balance model // J. Glaciol., 2000, vol. 46, No. 153, p. 244–252.
- Jin Z., Charlock T.P., Yang P., Xie Y., Miller W.** Snow optical properties for different particles shapes with application to snow grain size retrieval and MODIS/CERES radiance comparison over Antarctica // Remote Sensing of Environ., 2008, vol. 112, p. 3563–3581.
- Knap W.H., Brock B.W., Oerlemans J., Willis I.C.** Comparison of Landsat TM-derived and ground-based albedos of Haut Glacier d'Arolla, Switzerland // Intern. J. Remote Sensing, 1999, vol. 20, No. 17, p. 3293–3310.
- Kronenberg J.** Linking ecological economics and political ecology to study mining, glaciers and global warming // Environ. Policy and Governance, 2013, vol. 23, p. 75–90.
- Li Z.Q., Li H.L., Chen Y.N.** Mechanisms and simulation of accelerated shrinkage of continental glaciers: a case study of Urumqi Glacier No. 1 in Eastern Tianshan, Central Asia // J. Earth Science, 2011, vol. 22, iss. 4, p. 423–430.
- Liang S.** Narrowband to broadband conversions of land surface albedo i algorithms // Remote Sensing of Environ., 2001, vol. 76, p. 213–238.
- Liang S., Shuey J.C., Russ A.L. et al.** Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: II. Validation // Remote Sensing of Environ., 2003, vol. 84, p. 25–41.
- Lucht W., Hyman A.H., Strahler A.H. et al.** A comparison of satellite-derived spectral albedos to ground-based broadband albedo measurements modeled to satellite spatial scale for a semidesert landscape // Remote Sensing of Environ., 2000, vol. 74, p. 85–98.
- Naegeli K., Damm A., Huss M. et al.** Cross-comparison of albedo products for glacier surfaces derived from airborne and satellite (Sentinel-2 and Landsat 8) optical data // Remote Sensing, 2017, No. 9, p. 110–132.
- Oerlemans J., Giesen R., Van Den Broeke M.** Retreating alpine glaciers: increased melt rates due to accumulation of dust (Vadret da Morteratsch, Switzerland) // J. Glaciol., 2009, vol. 55, No. 192, p. 729–736.
- Oerlemans J., Knap W.A.** 1 year record of global radiation and albedo in the ablation zone of Morteratschgletscher, Switzerland // J. Glaciol., 1998, vol. 44, p. 231–238.
- Petrakov D., Shpuntova A., Aleinikov A. et al.** Accelerated glacier shrinkage in the Ak-Shyirak massif, inner Tien Shan, during 2003–2013 // Sci. Total Environ., 2016, vol. 562, p. 364–378.
- Pimentel R., Aguilar C., Herrero J. et al.** Comparison between snow albedo obtained from Landsat TM, ETM+ Imagery and the SPOT VEGETATION albedo product in a Mediterranean Mountainous site hydrology // Hydrology, 2016, vol. 3, No. 10, p. 1–19.
- Pope A., Rees W.G.** Impact of spatial, spectral, and radiometric properties of multispectral imagers on glacier surface classification // Remote Sensing of Environ., 2014, vol. 141, p. 1–13.
- Solar Radiation Measurements – Kipp&Zonen.** – URL: <http://www.kippzonen.com> (дата обращения: 22.03.2018).
- SP Lite 2** Pyranometer. Instruction Manual. June 2015. – URL: https://s.campbellsci.com/documents/ca/manuals/splite2_man.pdf (дата обращения: 22.03.2018).
- Storey J., Choate M., Lee K.** Landsat 8 operational land imager on-orbit geometric calibration and performance // Remote Sensing, 2014, vol. 6, p. 11127–11152.
- The Eppley Laboratory.** – URL: <http://www.eppleylab.com> (дата обращения: 22.03.2018).
- USGS Product Guide: Landsat 4-7 Climate Data Record (CDR) Surface Reflectance. Version 7.0. 2016.** – URL: https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/ledaps_product_guide.pdf (дата обращения: 22.03.2018).
- Warren S.G.** Optical properties of snow // Rev. Geophysics, 1982, vol. 20, p. 67–89.
- What are the band designations for the Landsat satellites? –** URL: <https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites> (дата обращения: 22.03.2018).
- Wu X., Wang N., Lu An. et al.** Variations in albedo on Dongkemadi Glacier in Tanggula Range on the Tibetan Plateau during 2002–2012 and its linkage with mass balance // Arctic, Antarctic, and Alpine Res., 2015, vol. 47, No. 2, p. 71–82.

References

- Glazovskaya M.A. Eolovye melkozemistye nakopleniya na lednikakh khrebta Terskei Ala-Tau [Fine-grained Aeolian Deposits on the Terskey Alatau Glaciers]. Transactions, Institute of Geography, Moscow, 1952, 49 p. (in Russian).
- Kaulbars A.V. Data on the Tien Shan geography collected during a trip. In: Zapiski Russkogo Geograficheskogo Obshchestva po Obshchej Geografii [Reports of the Russian Geographical Society, General Geography], 1875, vol. 5, p. 253–539 (in Russian).
- Konovalov V.G. Tayanie snega i stok s lednikov [Snow melting and glacier runoff]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1985, 121 p. (in Russian).
- Kuzmichonok V.A. Dust content in the atmosphere and glaciers in the area of the Kumtor Deposit (Ak-Shyirak, Tien Shan). Led i Sneg [Ice and Snow], 2012, No. 2, p. 131–140 (in Russian).
- Stepanov I.N. Snowpacks in the Tien Shan. Priroda [Nature], 1961, No. 1, p. 109–110 (in Russian).
- Torgoev I.A. Ledniki, zoloto i geohkologiya Kumtora [Glaciers, gold and geocology of Kumtor]. Riga, Lambert Academic Publishing, 2017, 204 p. (in Russian).
- Torgoev I.A., Aleshin Yu.G. Ekologiya gornopromyshlennogo kompleksa Kyrgyzstana [Environmental Issues of Mining and Ore Processing in Kyrgyzstan]. Bishkek, Ilim, 2001, 239 p. (in Russian).
- Aoki T., Motoyoshi H., Kodama Y. et al. Variations of snow physical parameters and their effects on albedo in Sapporo, Japan. Ann. Glaciol., 2007, vol. 46, p. 375–281.
- As D.V., Hubbard A., Hasholt B. et al. Large surface meltwater discharge from the Kangerlussuaq sector of the Greenland ice

- sheet during the record warm year 2010 explained by detailed energy balance observations. *The Cryosphere*, 2012, No. 6, p. 199–209.
- Brest C.L., Goward S.N. Deriving surface albedo measurements from narrow band satellite data. *Intern. J. Remote Sensing*, 1987, No. 8 (3), p. 351–367.
- Brock B.W., Willis I.C., Sharp M.J. Measurement and parameterization of albedo variations at Haut Glacier d’Arolla. Switzerland. *J. Glaciol.*, 2000, vol. 46, issue 155, p. 675–688.
- Dozier J., Green R., Nolin A., Painter T. Interpretation of snow properties from imaging spectrometry. *Remote Sensing of Environ.*, 2009, vol. 113, p. S25–S37.
- Duguay C.R., LeDrew E.F. Estimating surface reflectance and albedo over rugged terrain from Landsat-5 Thematic Mapper over Rugged Terrain. *Photogrammetric Eng. and Remote Sensing*, 1992, vol. 58, No. 5, p. 551–558.
- Dumont M., Durand Y., Arnaud Y., Six D. Variational assimilation of albedo in a snowpack model and reconstruction of the spatial distribution of an alpine glacier. *J. Glaciol.*, 2011, vol. 58, No. 207, p. 151–164.
- Franch B., Vermote E.F., Claverie M. Intercomparison of Landsat albedo retrieval techniques and evaluation against in situ measurements across the US SURFRAD network. *Remote Sensing of Environ.*, 2014, vol. 152, p. 627–637.
- Fujita K. Influence of precipitation seasonality on glacier mass balance and its sensitivity to climate change. *Ann. Glaciol.*, 2008a, vol. 48, p. 88–92.
- Fujita K. Effect of precipitation seasonality on climatic sensitivity of glacier mass balance. *Earth and Planet. Sci. Lett.*, 2008b, vol. 276, No. 1–2, p. 14–19.
- Fujita K., Ageta Y. Effect of summer accumulation on glacier mass balance on the Tibetan Plateau revealed by mass balance model. *J. Glaciol.*, 2000, vol. 46, No. 153, p. 244–252.
- Jin Z., Charlock T.P., Yang P., Xie Y., Miller W. Snow optical properties for different particles shapes with application to snow grain size retrieval and MODIS/CERES radiance comparison over Antarctica. *Remote Sensing of Environ.*, 2008, vol. 112, p. 3563–3581.
- Knap W.H., Brock B.W., Oerlemans J., Willis I.C. Comparison of Landsat TM-derived and ground-based albedos of Haut Glacier d’Arolla, Switzerland. *Intern. J. Remote Sensing*, 1999, vol. 20, No. 17, p. 3293–3310.
- Kronenberg J. Linking ecological economics and political ecology to study mining, glaciers and global warming. *Environ. Policy and Governance*, 2013, vol. 23, p. 75–90.
- Li Z.Q., Li H.L., Chen Y.N. Mechanisms and simulation of accelerated shrinkage of continental glaciers: a case study of Urumqi Glacier No. 1 in Eastern Tianshan, Central Asia. *J. Earth Science*, 2011, vol. 22, issue 4, p. 423–430.
- Liang S. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo i algorithms. *Remote Sensing of Environ.*, 2001, vol. 76, p. 213–238.
- Liang S., Shuey J.C., Russ A.L. et al. Narrowband to broadband conversions of land surface albedo: II. Validation. *Remote Sensing of Environ.*, 2003, vol. 84, p. 25–41.
- Lucht W., Hyman A.H., Strahler A.H. et al. A comparison of satellite-derived spectral albedos to ground-based broadband albedo measurements modeled to satellite spatial scale for a semidesert landscape. *Remote Sensing of Environ.*, 2000, vol. 74, p. 85–98.
- Naegeli K., Damm A., Huss M. et al. Cross-comparison of albedo products for glacier surfaces derived from airborne and satellite (Sentinel-2 and Landsat 8) optical data. *Remote Sensing*, 2017, No. 9, p. 110–132.
- Oerlemans J., Giesen R., Van Den Broeke M. Retreating alpine glaciers: increased melt rates due to accumulation of dust (Vadret da Morteratsch, Switzerland). *J. Glaciol.*, 2009, vol. 55, No. 192, p. 729–736.
- Oerlemans J., Knap W.A. 1 year record of global radiation and albedo in the ablation zone of Morteratschgletscher, Switzerland. *J. Glaciol.*, 1998, vol. 44, p. 231–238.
- Petrakov D., Shpuntova A., Aleinikov A. et al. Accelerated glacier shrinkage in the Ak-Shyirak massif, inner Tien Shan, during 2003–2013. *Sci. Total Environ.*, 2016, vol. 562, p. 364–378.
- Pimentel R., Aguilar C., Herrero J. et al. Comparison between snow albedo obtained from Landsat TM, ETM+ Imagery and the SPOT VEGETATION albedo product in a Mediterranean Mountainous site hydrology. *Hydrology*, 2016, vol. 3, No. 10, p. 1–19.
- Pope A., Rees W.G. Impact of spatial, spectral, and radiometric properties of multispectral imagers on glacier surface classification. *Remote Sensing of Environ.*, 2014, vol. 141, p. 1–13.
- Solar Radiation Measurements – Kipp&Zonen. – URL: <http://www.kippzonen.com> (submittal date: 22.03.2018).
- SP Lite 2 Pyranometer. Instruction Manual. June 2015. – URL: https://s.campbellsci.com/documents/ca/manuals/splite2_man.pdf (submittal date: 22.03.2018).
- Storey J., Choate M., Lee K. Landsat 8 operational land imager on-orbit geometric calibration and performance. *Remote Sensing*, 2014, vol. 6, p. 11127–11152.
- The Eppley Laboratory. – URL: <http://www.eppleylab.com> (submittal date: 22.03.2018).
- USGS Product Guide: Landsat 4-7 Climate Data Record (CDR) Surface Reflectance. Version 7.0. 2016. – URL: https://landsat.usgs.gov/sites/default/files/documents/ledaps_product_guide.pdf (submittal date: 22.03.2018).
- Warren S.G. Optical properties of snow. *Rev. Geophysics*, 1982, vol. 20, p. 67–89.
- What are the band designations for the Landsat satellites? – URL: <https://landsat.usgs.gov/what-are-band-designations-landsat-satellites> (submittal date: 22.03.2018).
- Wu X., Wang N., Lu An. et al. Variations in albedo on Dongkemadi Glacier in Tanggula Range on the Tibetan Plateau during 2002–2012 and its linkage with mass balance. *Arctic, Antarctic, and Alpine Res.*, 2015, vol. 47, No. 2, p. 71–82.

*Поступила в редакцию 26 марта 2018 г.,
после доработки – 10 декабря 2018 г.,
принята к публикации 19 декабря 2018 г.*