

Мониторинг ледника Колка в 2014–2017 гг. методом наземной стереофото съёмки© 2019 г. К.А. Аристов¹, Д.А. Петраков¹, Н.В. Коваленко¹,
С.А. Тимонин², А.А. Колчин¹, В.Н. Дробышев³¹Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, Москва, Россия; ²Высшая школа экономики, Москва, Россия; ³Владикавказский научный центр РАН и Правительства Республики Северная Осетия–Алания, Владикавказ, Россия
k.a.aristov@mail.ru**Monitoring of Kolka Glacier in 2014–2017 by terrestrial stereophotogrammetry**K.A. Aristov¹, D.A. Petrakov¹, N.V. Kovalenko¹, S.A. Timonin², A.A. Kolchin¹, V.N. Drobyshev³¹Lomonosov Moscow State University, Moscow, Russia; ²Higher School of Economics, Moscow, Russia;
³Vladikavkaz Scientific Centre of the RAS and the Government of the Republic of North Ossetia–Alania, Vladikavkaz, Russia
k.a.aristov@mail.ru*Received May 6, 2018 / Revised November 21, 2018 / Accepted December 21, 2018***Keywords:** *glacial disasters, ground stereoscopic photography, the Kolka Glacier, monitoring of volume change.***Summary**

The Kolka Glacier, which rushed down the Genaldon valley on September 20, 2002 (North Ossetia), is now recovering after this catastrophe. One of the most important ways to predict a new disaster is to determine the rate of ice accumulation of the new glacier and to monitor the glacier volume regularly, since its trigger mechanisms have not yet been fully studied. Recent changes of the Kolka Glacier were investigated by means of ground stereoscopic photography. The field works were carried out in 2014, 2016 and 2017. Shooting was made manually with a digital camera Canon 5D Mark II (without using a tripod) at arbitrary points, the distance between which did not exceed 100 m. The reference points were placed on the elevated relief forms on the glacier surface and coordinated by a differential GNSS receiver in the "fast static" mode. Laboratory processing of the photos was performed using Agisoft Photoscan software in automatic mode, except for the procedure of identification of reference points on stereo images. The processing made possible to obtain digital models of the glacier surface in GeoTIFF format, the vertical error of which amounted to 0.7 m, while the horizontal one – 2.3 m. In 2014–2017, the maximal increase in height of the surface (up to 30 m) was recorded in the low part of the glacier tongue that was the result of advancing of the Kolka front along the ice-free surface. Mean annual increase in the surface elevation was equal to 2.2 m/year. Lowering of the surface in some areas may be explained by the slowing-down of the glacier flow rate, which led to the appearance of thermokarst. The glacier volume increased by 7.4 ± 0.7 million m^3 . As a result, the glacier tongue advanced by 50–70 m. Average over 2014–2017 increasing in the surface elevation (2.2 m/year) was slightly smaller than in 2004–2014 (3 m/year). Quick growth of the Kolka Glacier contrasts sharply with decreasing of volume of the representative Caucasus, Djankuat and Garabashi, over the same period.

Citation: Aristov K.A., Petrakov D.A., Kovalenko N.V., Timonin S.A., Kolchin A.A., Drobyshev V.N. Monitoring of Kolka Glacier in 2014–2017 by terrestrial stereophotogrammetry. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2019. 59 (1): 49–58. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2019-1-49-58.

*Поступила 6 мая 2018 г. / После доработки 21 ноября 2018 г. / Принята к печати 21 декабря 2018 г.***Ключевые слова:** *ледник Колка, мониторинг изменения объёма, наземная фотограмметрия, опасные гляциальные процессы.*

По данным наземной стереоскопической съёмки в 2014, 2016 и 2017 гг. оценены изменения объёма ледника Колка, восстанавливающегося после гляциальной катастрофы 2002 г. Ледник продолжает расти несмотря на неблагоприятные для ледников Кавказа климатические условия. Высоты поверхности ледника увеличивалась в среднем на 2,2 м/год, что резко контрастирует с негативным состоянием большинства ледников Кавказа.

Введение

Согласно действующим нормативным документам [1], топографическое картографирование может выполняться следующими методами: тахеометрическим; на основе спутниковых геодезических определений; лазерным сканированием с воздуха в сочетании с цифровой аэрофото съёмкой; наземным статическим или

мобильным лазерным сканированием; цифровой аэрофото съёмкой, в том числе с применением беспилотных летательных аппаратов; стереотопографическим; комбинированным аэрофото топографическим, в том числе с применением результатов ДЗЗ; сочетанием различных методов.

Наиболее распространённые методы выполнения топографической съёмки в горной местности в настоящее время – тахеометриче-

ская съёмка, метод спутниковых геодезических определений и лазерное сканирование, однако ранее широко использовался стереотопографический метод. В инструкции [2] этот метод описан как наземная фототопографическая съёмка, но в последнее время он не находил широкого применения. К основным причинам, по которым данный метод не использовался, относятся сложность выполнения фототеодолитной съёмки, а также трудности при обработке материалов наземной цифровой стереосъёмки с использованием классических фотограмметрических методик. Появившиеся в последнее время программные продукты позволяют в значительной степени автоматизировать процесс обработки цифровых стереоскопических фотографий [3], однако остаются открытыми вопросы выполнения топографической съёмки с использованием данных технологий и точности получаемых результатов.

Объект нашего исследования – ледник Колка, расположенный в верховьях Геналдонского ущелья, у северного подножия Казбекско-Джигарайского массива в районе горы Казбек на Центральном Кавказе. Этот ледник известен своими повторяющимися катастрофами. В ходе последней из них, 20 сентября 2002 г., практически весь ледник сорвался со своего ложа и пронёсся вниз по ущелью в виде ледово-водно-каменного потока, преодолев за 6 минут около 19 км. Основная масса была остановлена Скалистым хребтом, ниже которого сошёл селевый поток с дальностью выброса около 17 км.

Большой вклад в аккумуляцию ледника вносят снежные и ледяные лавины, сходящие со склонов горы Джигарай-Хох и её восточного отрога. Траектория лавин проходит по крутым скальным и осыпным склонам, что объясняет значительное обогащение лавинного потока каменно-обломочным материалом. В освобождённом ложе ледника начали накапливаться массы льда и каменно-обломочного материала, формирующие тело нового ледника Колка. Некоторые каменные глыбы достигают нескольких метров в диаметре, что делает их весьма заметными на поверхности. К 2014 г. объём ледника составил около 40% объёма ледника перед катастрофой [4]. В последние годы скорость нарастания площади ледника резко снизилась, предполагалось, что в 2015–2016 гг. ледник находился в состоянии, близком к балансовому

равновесию [5]. Изменения объёма ледника после 2014 г. пока не определялись. Учитывая весьма мрачную «биографию» ледника Колка и впервые представившуюся возможность наблюдать его полное развитие до вполне вероятной следующей катастрофы, в 2004 г. был начат инструментальный мониторинг этого ледника [4]. Цель данной работы – оценка изменений высоты поверхности ледника в 2014–2017 гг.

Методика работ

Для оценки последних изменений ледника Колка была разработана и протестирована методика выполнения цифровой наземной стереоскопической съёмки. Её дальнейшую обработку вели в программном комплексе Agisoft PhotoScan с целью получения цифровых моделей поверхности ледника (ЦМП) за несколько лет. Отметим, что данный комплекс с успехом используется для обработки воздушных и наземных стереоскопических съёмок, в том числе и на ледниках [6, 7]. Полевые работы были разделены на два этапа: а) GNSS (Global Navigation Satellite System) – определение координат опорных точек; б) стереофотосъёмка ледника. Камеральные работы выполняли в три этапа: а) вычисление координат опорных точек; б) обработка стереофотографий и получение ЦМП; в) сравнение и анализ полученных ЦМП.

Определение координат опорных точек. Координаты опорных точек устанавливали с помощью комплекта одночастотных GNSS-приёмников Trimble R3. Съёмку вели без штатива, антенну размещали непосредственно на координируемой точке. Измерения проводили в режиме «Fast Static». Минимальная продолжительность измерений на точке (при наличии сигнала от шести спутников и более) – 15 минут. Дополнительно проводили фотосъёмку опорной точки. При этом для облегчения последующего поиска опорной точки на стереофотоснимках на кадре фиксировалась «ситуация» вокруг. Выбор расположения опорных точек был обусловлен несколькими факторами:

1) равномерным распределением точек по поверхности картографируемого объекта – ледника. Точки расположены как на фронте ледника, так и в его тыловой части. Особое внимание уделялось расположению точек на заднем плане (в тыловой части ледника), так как с удалением

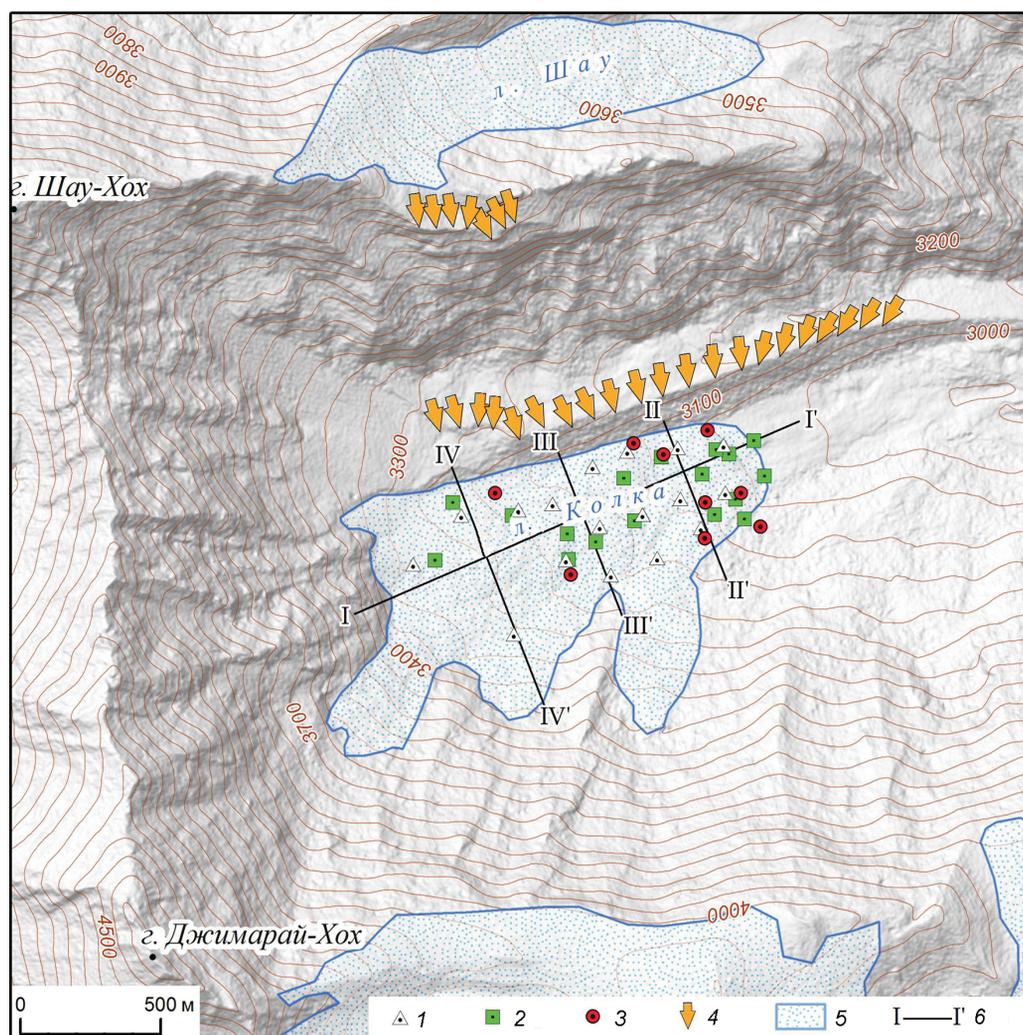


Рис. 1. Схема расположения района работ:

1, 2, 3 – опорные точки 2017, 2016, 2014 гг.;
4 – расположение точек стереофотосъёмки;
5 – границы ледников;
6 – линии профилей

Fig. 1. Sketch map of fieldwork area:

1, 2, 3 – ground control points in 2016, 2017, 2014;
4 – stereo photography points; 5 – glacier boundaries; 6 – longitudinal profile and cross-sections

от точки фотографирования возрастает погрешность определения координат по фотоснимкам;

2) уверенной дешифрируемостью опорных точек на фотоснимках. В качестве опорных точек, как правило, выбирались крупные камни (глыбы), выделяющиеся на фоне поверхности ледника Колка, покрытой обломочным материалом. Отметим, что определять опорные объекты (камни) следует заранее, при рекогносцировке, так как при прохождении маршрута трудно оценить возможность последующего дешифрирования на снимке того или иного камня. Дополнительной маркировки (например, краской) опорных точек не было, потому что измерялись координаты углов (вершин) камней, отчётливо определяемых на фотоснимке с погрешностью не более 3 пикселей (9–60 см);

3) доступностью и безопасностью при выполнении измерений. Опорные точки находят-

ся в шаговой доступности. При прохождении маршрута исключалось попадание в зоны камнепадов, образующихся на южном склоне Казбекско-Джимарайского массива.

Схема расположения опорных точек в 2014–2017 гг. приведена на рис. 1. Координаты опорных точек рассчитывались в проекции UTM, зона 38 на эллипсоиде WGS-84.

Цифровая наземная стереофотосъёмка. Стереофотосъёмка выполнялась цифровой зеркальной камерой Canon EOS 5D Mark II. Использовался объектив Canon 50 mm f/1.8 с фиксированным фокусным расстоянием. Съёмка проводилась в режиме приоритета диафрагмы (Av) с максимальным диафрагменным числом для предотвращения «размыва» объектов. Фокусировка проводилась «вручную» на бесконечность. При значениях ISO не более 400 освещённость объекта позволяла выполнять съёмку с выдержкой 1/250–1/500 с,

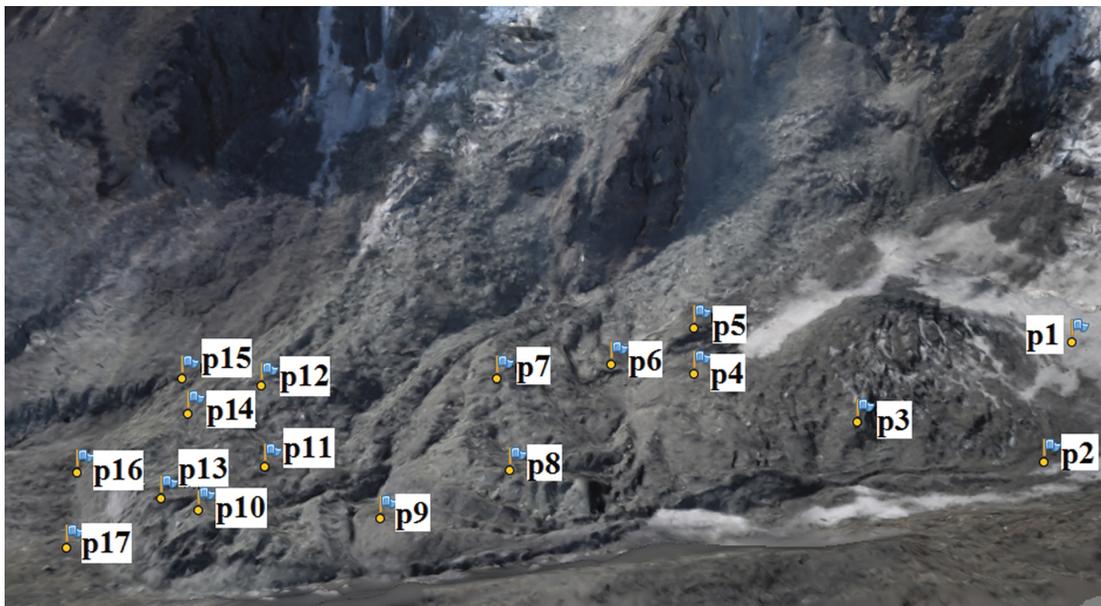


Рис. 2. Опорные точки на ЦМП ледника 2017 г., текстурированной по фотографиям в программе Agisoft PhotoScan (вид с восточного отрога горы Шай-Хох в сторону Казбекско-Джимарайского массива)

Fig. 2. Ground control points on glacier DSM of 2017 textured by photos in Agisoft PhotoScan (view from Mt. Shau-Khokh eastern ridge to Kazbek-Dzhimarai massif)

поэтому съёмку вели без использования штатива. Фотосъёмку проводили с произвольных базисов, расположенных на орографически левой морене ледника Колка и на хребте, разделяющем долины ледников Колка и Шау (см. рис. 1). Точки съёмки выбирали исходя из условий местности. Основное требование – отсутствие (или минимальная площадь) объектов на переднем плане кадра, при этом расстояние между точками съёмки составляло менее 100 м. Направление съёмки выбиралось таким образом, чтобы покрыть объект съёмки максимальным числом стереопар снимков. В некоторых случаях с одной точки съёмки выполняли фотографирование в разных направлениях.

Выполненные работы, по сути, представляют собой конвергентную цифровую наземную стереофотосъёмку с малыми базисами. Рекомендации по съёмке взяты из руководства пользователя программного обеспечения Agisoft PhotoScan [8]. Аналогичные подходы к проведению наземной съёмки использовали для построения ЦМП и в других горных районах [9]. Во время съёмки при помощи портативного GPS-навигатора фиксировали координаты снимков, которые затем занесли в метаданные изображений.

Построение моделей ледника. Обработка фотографий проводилась в фотограмметрическом про-

граммном комплексе Agisoft PhotoScan [8] и была разделена на несколько этапов: а) предварительное автоматизированное выравнивание фотографий; б) расстановка опорных точек и оптимизация выравнивания; в) построение плотного облака, содержащего более 11 млн точек, и ЦМП с разрешением 1 м; г) создание ортофотоплана и экспорт данных для последующего анализа. Расположение опорных точек на поверхности ледника в 2017 г. отражено на рис. 2. Отметим, что все этапы обработки, кроме расстановки опорных точек, проводятся автоматически и могут быть запущены в режиме пакетной обработки, что значительно сокращает трудозатраты. Стереофотоснимки, выполненные с базисов, расположенных на левой боковой морене ледника, и стереофотоснимки с базисов, расположенных на восточном отроге горы Шай-Хох (см. рис. 1), обрабатывались отдельно с последующим объединением результатов.

Обработка моделей ледника. Результаты обработки стереофотоснимков (модель поверхности и ортофотоплан) были экспортированы в формат GeoTIFF, который поддерживается большинством ГИС-пакетов. После построения ЦМП (рис. 3) по результатам съёмки за каждый год выполнялось их сравнение в программном комплексе QGIS 2.18. Продольный и поперечные профи-

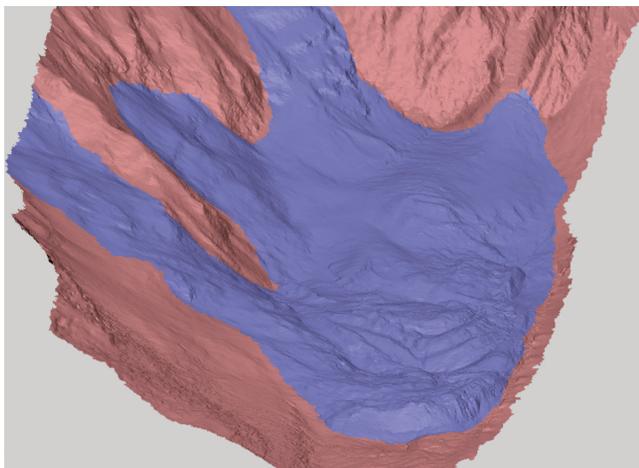


Рис. 3. Цифровая модель поверхности ледника Колка по данным стереофотосъёмки 2017 г.

Fig. 3. DSM of Kolka Glacier extracted from stereo imagery captured in 2017

ли строили с использованием инструмента Profile Tool. Карты изменения высоты поверхности ледника построены на основе результатов сравнения ЦМП, выполненного в модуле «Калькулятор растров». Изменение объёма вычислялось в модуле Raster Volume программного приложения SAGA (2.3.2), внедрённого в оболочку QGIS.

Полученные результаты и их обсуждение

Погрешности расчётов. Погрешность определения координат опорных точек не превышает 0,30 м в плане и 0,5 м по высоте, что, согласно [1], соответствует точности пунктов планово-высотного обоснования масштаба 1:5000. Погрешности уравнивания фотоснимков в Agisoft PhotoScan по опорным точкам не превышают 2,3 м в плане и 0,7 м по высоте. Схожие значения погрешностей относительно опорных точек получены при применении данной технологии для составления ЦМП вулканических кратеров с дальностью съёмки до 1000 м [10]. На более удалённых от точек съёмки участках погрешности возрастают, что соответствует мировой практике [11]. Для оценки точности полученных ЦМП проводилось сравнение значений высот, измеренных геодезическими GNSS-приёмниками и ЦМП. Полученные результаты позволяют сделать вывод, что в нашем случае цифровую наземную стереофотосъёмку можно использовать при создании ЦМП с точностью по высоте до 1,5 м.

Изменение высоты поверхности и объёма ледника Колка. На рис. 4 представлены продольный и поперечные профили, показывающие изменение высоты поверхности ледника Колка в 2014–2016 и 2016–2017 гг., а на рис. 5 – карта изменения высоты поверхности этого ледника за 2014–2017 гг. На продольном профиле хорошо видно, что высота поверхности выше и ниже ледника Колка не изменилась, что подтверждает корректность вычислений. Больше всего, на 30–40 м, поверхность повысилась в нижней части языка, в зоне фронта наступающего ледника. Это повышение произошло не за счёт увеличения толщины льда (см. рис. 5), а в результате перемещения фронта по свободной ото льда поверхности. Вслед за волной наступающего фронта на профиле прослеживается участок понижения поверхности. Чередование участков значительного повышения и последующего понижения поверхности прослеживается и выше по течению ледника на расстоянии от 400 до 900 м от современного фронта ледника. Это хорошо видно и на картах изменения высоты поверхности ледника. Вероятно, участки значительного повышения поверхности ледника (более 30 м) приурочены к участкам продвижения фронтальных зон потоков льда, сформировавшихся из ледников, обособившихся после катастрофы 2002 г. и слившихся в единый массив льда в 2009 г. [4]; зоны же понижения поверхности приурочены к областям с низкими скоростями движения льда. Летом 2017 г. на таких участках были отмечены термокарстовые просядки и озёра (см. рис. 5).

На поперечных профилях, расположенных на разном расстоянии от фронта ледника Колка, распределение изменения высоты поверхности отличается довольно сильно. На профиле II–II' максимальное увеличение высоты поверхности (25 м) отмечается на участке примыкания ледника к боковой морене. В средней части профиля отмечается обширный участок понижения поверхности (см. рис. 4), приуроченный к участку с озёрами (см. рис. 5). Наконец, по мере приближения к северной стене Казбекско-Джимарайского массива высота поверхности начинает расти. На профиле III–III', расположенном в средней части ледника, высота поверхности везде увеличилась на 10–25 м, небольшой участок понижения поверхности находится на склоне боковой морены. На профиле IV–IV', проходящем в верхней части ледника, также наблюдается повсеместное увеличе-

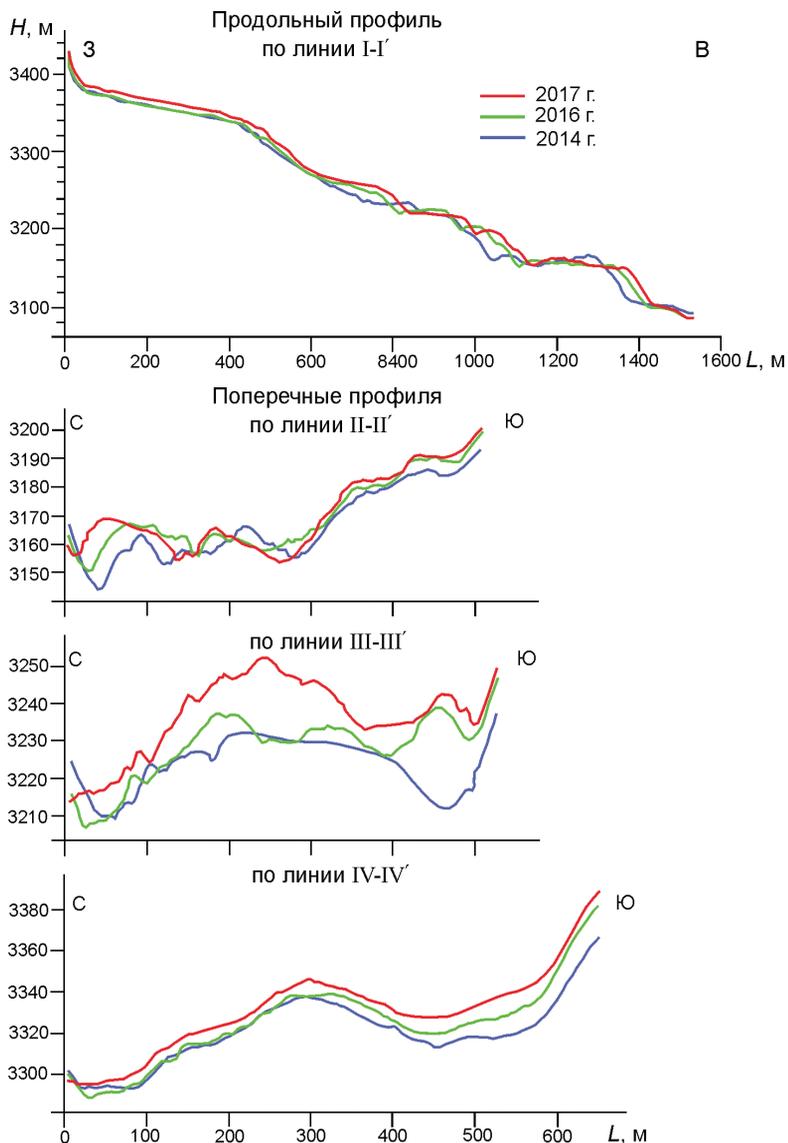


Рис. 4. Продольный и поперечные профили поверхности ледника Колка в 2014, 2016 и 2017 гг.

Fig. 4. Longitudinal profile and cross-sections of the Kolka Glacier surface in 2014, 2016 and 2017

ние высоты поверхности, значения которой растут по мере приближения к северной стене Казбекско-Джимарайского массива (см. рис. 4). Заметим, что участков понижения поверхности у подножия стены нет (см. рис. 5). Это показывает, что условия питания ледника Колка пока не ухудшились.

Летом 2017 г., как и в предшествующие тёплые сезоны, отмечалась аномальная активность камнепадов и микроселевых потоков, сходящих в тыловую часть ледника с северной стены Казбекско-Джимарайского массива. В условиях тёплой погоды конца июля шум от камнепадов практически не прекращался, небольшие камнепады сходили каждые 3–5 мин., более крупные – каждые 30–60 мин. На продолжа-

ющуюся высокую активность камнепадов указывал и Г.А. Носенко с соавторами [5]. За период 2014–2016 гг. объём накопления ледово-каменного материала на поверхности ледника составил $3,4 \pm 0,5$ млн м^3 , а за период 2016–2017 гг. – $4,0 \pm 0,5$ млн м^3 . В среднем за 2014–2017 гг. этот параметр составляет $2,5 \pm 0,3$ млн $\text{м}^3/\text{год}$. С учётом площади ледника $1,10 \text{ км}^2$ такое накопление за три года соответствует увеличению высоты поверхности на $2,2 \text{ м}/\text{год}$.

В 2014–2017 гг. значения баланса массы на опорных для Кавказа ледниках Джанкуат и Гарабаши составили -830 и $-950 \text{ мм}/\text{год}$ соответственно [12, 13]. С учётом средней плотности ледников Джанкуат и Гарабаши, равной $860 \text{ кг}/\text{м}^3$ [14], это соответствует уменьшению высоты поверхности данных ледников примерно на $1 \text{ м}/\text{год}$. Рост объёма ледника Колка контрастирует с потерей объёма опорных ледников, и быстрое восстановление этого ледника по-прежнему продолжается на фоне неблагоприятной для кавказского оледенения ситуации. Причины такого поведения ледника Колка детально анализировались в работах [4, 5]. На фоне сохранения зимних условий середины XX в. [5] таяние ледника резко уменьшилось из-за практически полного его перекрытия толстым слоем морены, оцениваемым в исследовании [5] в $15\text{--}20 \text{ см}$ в среднем по леднику. В результате абляция ледника значительно сократилась. Темпы восстановления ледника несколько уменьшились по сравнению с 2004–2014 гг. Объём ледника увеличился тогда на $3,3 \pm 0,7$ млн $\text{м}^3/\text{год}$ [4], а уменьшение находится в пределах погрешностей оценок. Баланс массы ледника Джанкуат в 2004–2014 гг. в среднем был равен $-560 \text{ мм}/\text{год}$ [4], что почти на $300 \text{ мм}/\text{год}$ больше, чем в 2014–2017 гг. Вероятно, менее благоприятные условия 2014–2017 гг. отразились и на темпах роста объёма ледника Колка (см. рис. 5).

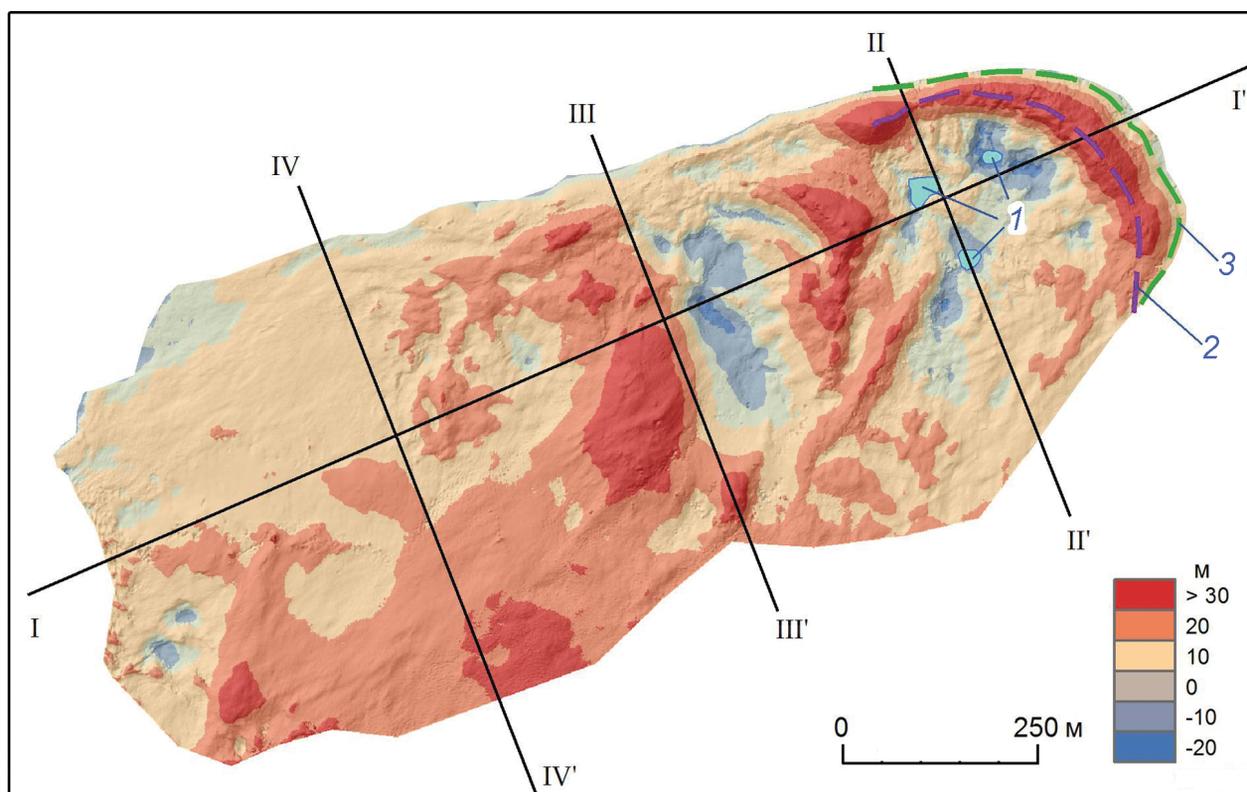


Рис. 5. Изменения высоты поверхности ледника Колка за 2014–2017 гг., м:

1 – термокарстовые озёра на поверхности ледника; 2, 3 – фронт ледника соответственно в 2014 и 2017 г.

Fig. 5. Surface elevation changes at the Kolka Glacier in 2014–2017, m

1 – thermokarst lakes on the glacier surface; 2, 3 – terminus of the glacier in 2014 and 2017

Изменение положения фронта ледника Колка.

Прямое следствие положительного баланса массы – продвижение фронта ледника Колка. В 2014–2017 гг. он продвинулся на 50–70 м, причём наибольшее продвижение было приурочено к центральным участкам (рис. 6). Внешний вид фронта не претерпел принципиальных изменений с 2016 г. Фронт остался крутым, имел высоту около 40 м, с многочисленными осыпными шлейфами у подножия (рис. 7).

Сравнение цифровой наземной стереосъёмки с другими методами топографической съёмки. В 2014 г. съёмка поверхности ледника Колка одновременно выполнялась несколькими методами: стереотопографическим, тахеометрическим, цифровой аэрофотосъёмкой с БПЛА (беспилотный летательный аппарат) [4]. Наиболее точные (до 3 см) и подробные ЦМП получены с использованием аэрофотосъёмки [15]. Применение БПЛА в горной местности затруднено из-за метеорологического фактора (сильные порывы ветра, неустойчивая погода). При

выполнения данного вида съёмки достаточно высок риск потери или повреждения съёмочного оборудования. К недостатку метода относится и необходимость подзарядки аккумуляторов БПЛА. Тахеометрический метод позволяет получить точные координаты снимаемых точек, но ограничен в их количестве. В течение дня можно провести измерения для нескольких сотен точек, поэтому картографирование элементов поверхности ведётся в камеральных условиях с помощью прорисовки горизонталей.

Метод спутниковых GPS-определений использовался только для координирования опорных и проверочных точек плано-высотного обоснования аэрофото- и стереотопографической съёмки. Использование данного метода для съёмки поверхности ледника нецелесообразно, так как из-за сложного рельефа приходилось бы делать пикеты на расстоянии до 20 м, при этом общая протяжённость маршрутов съёмки составила бы около 30 км. Кроме того, некоторые зоны ледника труднодоступны. Наземная стереоскопическая



Рис. 6. Ледник Колка 25 июля 2017 г. Вид с восточного плеча горы Шай-Хох. Выше термокарстовых озёр, расположенных в нижней части ледника, прослеживается область повышения поверхности. В тыловой части ледника видны многочисленные следы лавин и селевых потоков

Fig. 6. The Kolka Glacier on 25th July 2017. A view from the eastern ridge of Mt. Shau-Khokh. Above thermokarst lakes located at the lower part of the glacier an area of increasing surface elevation could be traced. Numerous traces of snow avalanches and debris flows are clearly visible at the rear part of the glacier

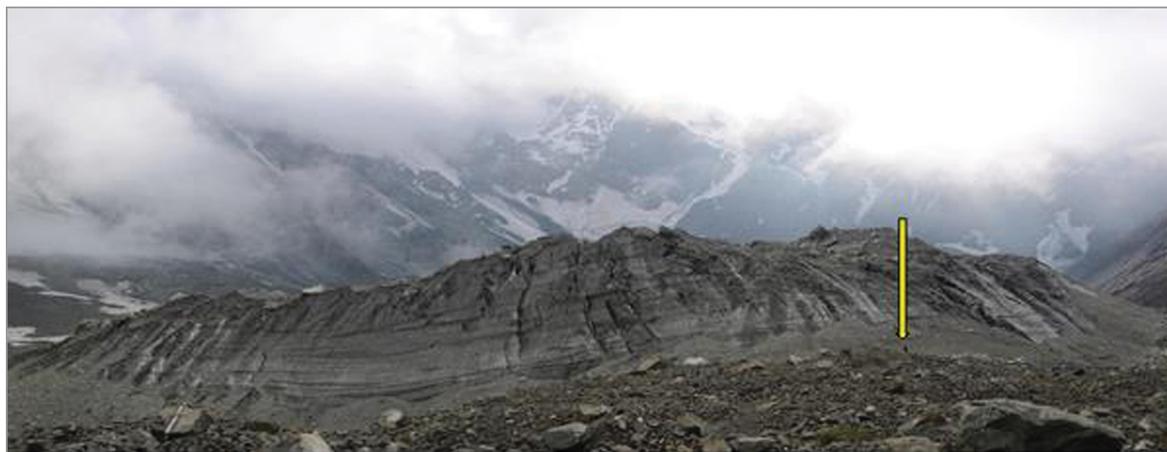


Рис. 7. Фронт ледника Колка 24 июля 2017 г.

Жёлтая стрелка указывает на фигуру человека

Fig. 7. Terminus of the Kolka Glacier on 24th July 2017.

Yellow arrow shows at a person

съемка в условиях ледника Колка при хорошей погоде занимает два дня. По плотности облака точек наземная стереоскопическая съемка усту-

пает съемке с БПЛА, но существенно превосходит тахеометрическую съемку. Высокая плотность облака точек имеет принципиальное значение в

условиях контрастного рельефа поверхности. Несмотря на более низкую по сравнению с тахеометрией и GPS-позиционированием точность определения координат отдельных точек, наземная стереоскопическая съёмка позволяет получить более высокое качество отображения поверхности. Стоимость оборудования и программного обеспечения для наземной стереоскопической съёмки существенно ниже, чем для всех остальных методов топографической съёмки. Наш опыт на леднике Колка подтверждает распространённое мнение о наземной стереоскопической съёмке как эффективном и недорогом решении для топографической съёмки в горной местности [3].

Заключение

В процессе полевых работ, выполненных в 2014, 2016 и 2017 гг. на леднике Колка, мы апробировали методику наземной стереофотосъёмки с произвольных базисов. Материалы данной съёмки позволяют получить цифровые модели горной местности, точность которых не уступает точности карт масштаба 1:10 000. Однако отметим и ряд недостатков использования данной методики. Так, в результате наличия «теневых» зон, изображение которых не попало в кадр, модель поверхности в этих зонах нередко интерполируется не в соответствии с действительностью. Кроме того, отмечается накопление погрешности определения координат точек по мере удаления от точки съёмки; присутствуют дефекты ортофотоплана на плоские участки местности,

снятые под острым углом. Использование данной методики наиболее целесообразно при исследовании быстро изменяющихся, больших по площади объектов в горной местности, поверхность которых позволяет выполнять автоматизированную обработку стереоснимков.

Сравнение моделей поверхности, полученных в результате наземной стереоскопической фотосъёмки, показало, что объём ледника в период с 2014 по 2017 г. увеличился на $7,4 \pm 0,7$ млн м³. Максимальное повышение поверхности (около 30 м) отмечено в прифронтальной части ледника. В тыловой его части, примыкающей к северной стене Казбекско-Джидарайского массива, поверхность повысилась на 20 м. Это показывает, что пока ухудшения условий питания ледника Колка не произошло. На отдельных участках поверхность понизилась. В 2014–2017 гг. поверхность ледника Колка повышалась в среднем на 2,2 м/год, что резко контрастирует с понижением поверхности опорных для Кавказа ледников Джанкуат и Гарабаши. С 2002 г. объём ледника Колка увеличился почти на 50 млн м³. На фоне сокращения кавказских ледников этот ледник продолжает набирать массу.

Благодарности. Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект 18-05-00520. Авторы выражают благодарность Г.А. Носенко и А.В. Погорелову за ценные замечания.

Acknowledgements. This work was supported by RFBR, project 18-05-00520. Authors thank G.A. Nosenko and A.V. Pogorelov for valuable comments.

Литература

1. СП 317.1325800.2017 Инженерно-геодезические изыскания для строительства. Общие правила производства работ. М.: Минстрой России, 2017. 79 с.
2. ГКИНП-02-033–82. М.: Недра, 1982. 98 с.
3. Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications // *Geomorphology*. 2012. V. 179. P. 300–314.
4. Петраков Д.А., Аристов К.А., Алейников А.А., Бойко Е.С., Дробышев В.Н., Коваленко Н.В., Тутубалина О.В., Черноморец С.С. Быстрое восстановление ледника Колка (Кавказ) после

References

1. SP 317.1325800.2017 *Inzhenerno-geodezicheskie izyskaniya dlya stroitel'stva. Obshchie pravila proizvodstva rabot. Minstroy Rossii*. Code of Rules 317.1325800.2017 engineering-geodetic surveys for construction. General rules of work, Ministry of construction of Russia. Moscow, 2017: 79 p. [In Russian].
2. *Geodezicheskie i kartograficheskie instruksii, normy i pravila-02-033–82*. Geodetic and cartographic instructions, norms and rules 02-033–82. Moscow: Nedra, 1982: 98 p. [In Russian].
3. Westoby M.J., Brasington J., Glasser N.F., Hambrey M.J., Reynolds J.M. 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*. 2012, 179: 300–314.
4. Petrakov D.A., Aristov K.A., Aleynikov A.A., Boyko E.S., Drobyshev V.N., Kovalenko N.V., Tutubalina O.V., Chernom-

- гляциальной катастрофы 2002 года // Криосфера Земли. 2018. Т. 22. № 1. С. 58–71.
5. Носенко Г.А., Рототаева О.В., Никитин Н.А. Особенности изменений ледника Колка с 2002 по 2016 г. // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 4. С. 468–482.
 6. Погорелов А.В., Бойко Е.С., Петраков Д.А., Киселев Е.Н. Динамика ледника Фишт (Западный Кавказ) в 1909–2015 гг. // Лёд и Снег. 2017. Т. 57. № 4. С. 498–506.
 7. Brun F., Buri P., Miles E.S., Wagnon P., Steiner J., Berthier E., Ragetli S., Kraaijenbrink P., Walter W., Immerzeel, Pellicciotti F. Quantifying volume loss from ice cliffs on debriscovered glaciers using high-resolution terrestrial and aerial photogrammetry // Journ. of Glaciology. 2016. V. 62. № 234. P. 684–695. <http://dx.doi.org/10.1017/jog.2016.54>.
 8. Руководство пользователя Agisoft PhotoScan: Professional Edition, версия 1.4. Дата публикации 2018. Agisoft LLC. http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_ru.pdf.
 9. Thoeni K., Giacomini A., Murtagh R., Kniest E. A comparison of multi-view 3D reconstruction of a rock wall using several cameras and a laser scanner // Proc. of ISPRS Technical Commission V Symposium, 23–25 June 2014, Riva del Garda, Italy. 2014. P. 573–580.
 10. James M.R., Robson S. Straight forward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: accuracy and geoscience application. Journ. of Geophys. Research. 2012. V. 117. F03017. <http://dx.doi.org/10.1029/2011jf002289>.
 11. Smith M.W., Carrivick J.L., Quincey D.J. Structure from motion photogrammetry in physical geography // Progress in Physical Geography. 2016. V. 40. № 2. P. 247–275. <http://dx.doi.org/10.1177/0309133315615805>.
 12. WGMS 2017. Global Glacier Change Bulletin No. 2 (2014–2015) / Eds.: M. Zemp, S.U. Nussbaumer, I. Gärtner-Roer, J. Huber, H. Machguth, F. Paul, M. Hoelzle. ICSU(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland, 244 p. Publication based on database version: doi:10.5904/wgms-fog-2017-10.
 13. Электронный ресурс: www.wgms.ch (дата последнего обращения 06.09.2018).
 14. Huss M. Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change // The Cryosphere. 2013. V. 7 № 3. P. 877–887.
 15. Коваленко Н.В., Петраков Д.А., Алейников А.А., Аристов К.А., Бойко Е.С., Дробышев В.Н., Черногорец С.С. Гляциологический мониторинг ледника Колка в 2002–2014 гг. // Вест. Владикавказского науч. центра. 2015. Т. 15. № 4. С. 43–50.
 - morets S.S. Fast regeneration of Kolka Glacier (Caucasus) after 2002 year glacial disaster. *Kriosfera Zemli. Earth's Cryosphere*. 2018, 22 (1): 58–71. [In Russian].
 5. Nosenko G.A., Rototaeva O.V., Nikitin S.A. Specific changes of the Kolka Glacier (the North Caucasus) from 2002 to 2016. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2017, 57 (4): 468–482. [In Russian].
 6. Pogorelov A.V., Boyko E.S., Petrakov D.A., Kiselev E.N. Fluctuations of the Fisht Glacier (West Cucasus) over 1909–2015. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2017, 57 (4): 498–506. [In Russian].
 7. Brun F., Buri P., Miles E.S., Wagnon P., Steiner J., Berthier E., Ragetli S., Kraaijenbrink P., Immerzeel W.W., Pellicciotti F. Quantifying volume loss from ice cliffs on debriscovered glaciers using high-resolution terrestrial and aerial photogrammetry. *Journ. of Glaciology*. 2016, 62 (234): 684–695. <http://dx.doi.org/10.1017/jog.2016.54>.
 8. *Rukovodstvo pol'zovatelya Agisoft PhotoScan: Professional Edition, versiya 1.4*. Agisoft PhotoScan user guide: Professional Edition, version 1.4, Agisoft LLC 2018 Agisoft LLC http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_ru.pdf. [In Russian].
 9. Thoeni K., Giacomini A., Murtagh R., Kniest E. A comparison of multi-view 3D reconstruction of a rock wall using several cameras and a laser scanner. *Proceedings of ISPRS Technical Commission V Symposium, 23–25 June 2014, Riva del Garda, Italy*. 2014: 573–580.
 10. James M.R., Robson S. Straightforward reconstruction of 3D surfaces and topography with a camera: accuracy and geoscience application. *Journ. of Geophys. Research*. 2012, 117: F03017. <http://dx.doi.org/10.1029/2011jf002289>.
 11. Smith M.W., Carrivick J.L., Quincey D.J. Structure from motion photogrammetry in physical geography. *Progress in Physical Geography*. 2016, 40 (2): 247–275. <http://dx.doi.org/10.1177/0309133315615805>.
 12. WGMS 2017. Global Glacier Change Bulletin No. 2 (2014–2015). Eds.: M. Zemp, S.U Nussbaumer, I. Gärtner-Roer, J. Huber, H. Machguth, F. Paul, and M. Hoelzle (ICSU(WDS)/IUGG(IACS)/UNEP/UNESCO/WMO, World Glacier Monitoring Service, Zurich, Switzerland, 244 p. Publication based on database version: doi: 10.5904/wgms-fog-2017-10.
 13. www.wgms.ch (last visited 06.09.2018).
 14. Huss M. Density assumptions for converting geodetic glacier volume change to mass change. *The Cryosphere*. 2013, 7 (3): 877–887.
 15. Kovalenko N.V., Petrakov D.A., Aleynikov A.A., Aris-tov K.A., Boiko E.S., Drobyshev V.N., Chernomoret-s S.S. The glaciological monitoring of Kolka Glacier in 2002–2014. *Vestnik Vladikavkazskogo Nauchnogo Tsentra. Bulletin of Vladikavkaz Scientific Center*. 2015, 15 (4): 43–50. [In Russian].