

Оценка эволюции ледниковых систем Северо-Востока России по данным регулярного метеорологического архива

© 2018 г. А.Ю. Михайлов, М.Д. Ананичева

Институт географии РАН, Москва, Россия

miha_ku@mail.ru

Assessment of the evolution of the Northeastern Russia glacier systems using regular grid meteorological data

A.Yu. Mikhailov, M.D. Ananicheva

Institute of Geography, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

miha_ku@mail.ru

Received November 1, 2017

Accepted March 21, 2018

Keywords: equilibrium line altitude, grid data archive, precipitation, projection, satellite image, temperature, the USSR Glacier inventory, trends.

Summary

A methodical approach is proposed for calculating the equilibrium line altitude H_{ELA} of glacier systems (on the example of the Northeastern Russia) on the basis of the characteristics that determine it in time and space: from the archive of temperature and precipitation at the grid points (the UDel archive, Delaware University). This data is used in the equation of mass balance of the glacier systems for the calculation of its components. As a result, the output is the inter-annual series of deviations of H_{ELA} from the mean value and the ratio between accumulation and solid precipitation in the regular grids over the glacial systems. By the long-term series of the H_{ELA} deviations the periods of minimum and maximum H_{ELA} state were revealed for various glacial systems, as well as linear trends of these series. This made us possible to evaluate the H_{ELA} trends in the future using the linear regression method. The sensitivity of the method of the initial parameters – the mean values of the summer air temperature, solid precipitation and the H_{ELA} value, received independently, have been estimated. Thus, the method allows detailing the H_{ELA} changes in space with the resolution of the archive used, and in time for each year of the selected climatic period.

Citation: Mikhailov A.Yu., Ananicheva M.D. Assessment of the evolution of the Northeastern Russia glacier systems using regular grid meteorological data. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2018. 58 (3): 322–332. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2018-3-322-332.

Поступила 1 ноября 2017 г.

Принята к печати 21 марта 2017 г.

Ключевые слова: архив сеточных данных, высота границы питания, Каталог ледников СССР, космический снимок, прогноз, твёрдые осадки, температура, тренды.

Предлагается методический подход для вычисления высоты границы питания H_{ELA} ледниковых систем (на примере Северо-Востока России) по архивным данным о температуре и осадках в узлах регулярной сетки $0,5^\circ \times 0,5^\circ$. По связи между архивными твёрдыми осадками и аккумуляцией для десяти ледниковых систем вычислены межгодовые ряды изменения H_{ELA} за 1949–2014 гг. и их линейные тренды для прогноза этой величины.

Введение

Под оценкой эволюции мы понимаем изменение во времени высоты границы питания и баланса массы ледниковых систем. Для подобных оценок используются данные метеорологических станций вблизи ледниковых систем в виде рядов летней температуры T_{sum} , связанной с абляцией, и твёрдых осадков Z_{sol} , определяющих аккумуляцию. Некоторая неопределённость этих данных состоит в невозможности учесть вклад тенденций метеоданных близлежа-

щих станций в эволюцию исследуемой ледниковой системы (имеется в виду влияние различий густоты точек наблюдения и их положения по отношению к исследуемому объекту). Другая проблема касается недостаточности длины и непрерывности периодов наблюдений, необходимых для исследования ледниковых систем.

Указанные проблемы могут быть решены с помощью использования регулярного (в пространстве и во времени) архива метеопараметров. Существует несколько таких архивов, сравнение которых рассмотрено в работе [1]. Мы

использовали архив Университета штата Делавэр (США) (в дальнейшем «архив» UDel) [2]. Этот архив представляет собой месячные данные различных метеорологических характеристик над сушей в узлах регулярной сетки ($0,5^\circ \times 0,5^\circ$) за каждый год для периода 1900–2014 гг. В архиве применяется метод оптимальной интерполяции, который при расчёте величин в узлах регулярной сетки использует статистические веса как функции расстояния от множества соседних метеостанций. Такой подход позволяет решить проблему пространственной (переменная плотность сети станций) и временной (различные периоды наблюдений для разных станций) неоднородности. Недостаток рядов данного архива состоит в отсутствии большинства данных в первую половину (до 1949 г.) архивного интервала времени, что обусловило ограничение наших исследований интервалом 1949–2014 гг.

Пространственный анализ различных величин в этом архиве имеет свои особенности. Так, при анализе поля средней месячной температуры T разработчики архива сначала выполнили приведение её к уровню моря на станциях (с учётом высоты станции и величины вертикального градиента $\gamma = 0,006^\circ\text{C}/\text{м}$ для стандартной атмосферы с последующей интерполяцией в узлы сетки). Затем в каждом узле в соответствии с его высотой над уровнем моря h проводили понижение температуры на величину γh . В архиве дана толщина снежного покрова за каждый месяц как сумма осадков за период с температурой воздуха $T < 0$. Чтобы определить твёрдые осадки Z_{sol} из архива, мы использовали такой показатель, как максимальная толщина снежного покрова в водном эквиваленте (миллиметр слоя осаждаемой воды).

Для оценки ошибки интерполяции в архиве для каждого значения (в пространстве и времени) используемых величин имеются данные кросс-валидации, которые представляют собой интерполированные данные абсолютных значений разностей между значениями на станциях и интерполированными значениями в эту же точку при исключении данной станции при интерполяции. Данные кросс-валидации позволяют оценить разброс искомой величины от максимума к минимуму. К сожалению, такого рода данные для твёрдых осадков отсутствуют, поэтому оценку разброса конечных данных мы выполнили только по данным кросс-валидации сумм осадков за

период с октября по апрель включительно. Предварительное сравнение средних многолетних полей сумм осадков за период октябрь–апрель Z_{10-4} и сумм твёрдых осадков Z_{sol} показало, что для широт южнее 70° с.ш. эти величины связаны соотношением $Z_{sol} = 1,1Z_{10-4}$ со значимым коэффициентом корреляции 0,94. Это позволило оценивать ошибки интерполяции по данной формуле.

Пространственный анализ полей сумм осадков в архивах такого рода имеет один существенный недостаток – неполный учёт влияния рельефа. Действительно, большинство метеостанций на Северо-Востоке России расположено в крупномасштабных понижениях рельефа (побережье, межгорные котловины, долины рек), где величина суммы осадков, как правило, понижена по сравнению с окружающими горами. Поскольку интерполяция данных в узлах станций не предполагает учёта различных характеристик рельефа (высота, средний уклон и т.д.), поля осадков в узлах регулярной сетки не соответствуют пространственной неоднородности рельефа и, как правило, не превышают значений на соседних станциях. В действительности, как показывает анализ данных редких водораздельных станций (менее 10% всех станций), суммы осадков в соседних долинах и водоразделах могут различаться более чем в 1,5–2 раза, особенно на склонах, наветренных по отношению к горизонтальному потоку влаги. Несмотря на это, данный архив, как и другие аналогичные архивы, объективно отражает временные тенденции рядов осадков для крупных территорий, так как закрывает перерывы в наблюдениях данными соседних станций и путём добавления новых станций.

Исследование тенденций изменения ледниковых систем и прогноз их состояния

Задача исследования тенденций изменения температуры и осадков ледниковых систем решалась на примере современного оледенения Северо-Востока России. Было выбрано десять ледниковых систем, координаты которых представлены в табл. 1, где N_p – число архивных ячеек $0,5^\circ \times 0,5^\circ$, охватывающих данную ледниковую систему; h – средняя высота этих ячеек по цифровому архиву высот Etopo5, м; H_{ELA} – высота границы питания ледника, м. Высота H_{ELA} за-

Таблица 1. Границы областей ледниковых систем (1–10) в географических координатах и другие исходные параметры

Границы областей ледниковых систем и другие параметры	Горы Бырранга (п-ов Таймыр)	Хребет Орулган (север горной системы Верхоянского хребта)	Хребет Черского, массив Буордах (ледниковая система вблизи пика Победы)	Хребет Сунтар-Хаята	Корякское нагорье		П-ов Тайгос (система Колымского нагорья)	Чукотское нагорье южная часть, район зал. Креста)	Северо-Восток Корякского нагорья (Мейныпильгинский хребет)	Чукотский п-ов
					север	юг				
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Границы, градусы южная	75,7	67,2	65,02	61,7	61,3	60,7	60,8	66,2	62,5	64,5
северная	76	69	65,2	62,9	62,3	61,3	62,3	66,8	63,3	65,3
западная	107,2	127,7	145,4	140,6	170,7	170,7	160,3	–179,8	176	–175,3
восточная	108	128,8	146,1	141,8	173,3	172,8	163,3	–178,2	178	–172,7
Число ячеек N_p	2	12	3	9	12	7	9	7	8	9
Средняя высота ячеек h , м	630	1100	1600	1670	730	460	540	330	350	270
Высота границы питания H_{ELA} , м	700	1900	2300	2370	900	750	850	770	730	520

Таблица 2. Параметры летней температуры, твёрдых осадков и их линейных трендов для десяти ледниковых областей за 1949–2014 гг. (названия ледниковых систем 1–10 см. табл. 1)*

Параметры	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Средние твёрдые осадки \bar{Z}_{sol} , мм	167	131	88	104	257	251	250	228	297	358
Средняя ошибка интерполяции осадков $\pm \bar{Z}_{cv}$, мм	56	35	25	43	92	110	51	123	110	162
Значение тренда твёрдых осадков trZ_{sol} , мм/год	0,8*	0,4	–0,1*	–0,2*	–1,5	–2,2	–1,4	1,0	–1,5	–3,5
Среднее значение летней температуры воздуха \bar{T}_{sum} , °C	–1,3	6,8	6,1	6,8	4,9	6,4	8,4	7,1	6,5	6,2
Средняя ошибка интерполяции температуры $\pm \bar{T}_{cv}$, °C	0,8	0,9	1,0	1,1	0,6	0,5	1,0	1,1	0,8	0,7
Значение тренда летней температуры воздуха trT_{sum} , C/год	0,011	0,019	0,021	0,025	0,026	0,027	0,018	–0,01*	0,028	0,01*

Тренды, обозначенные значком «», статистически не значимы при $p > 5\%$ (p – вероятность принятия гипотезы об отсутствии тренда).

давалась по результатам работ [3–5] для современного периода (базового), который охватывает вторую половину XX в. – с 1960-х по 1990-е годы.

Климат ледниковых систем. Для анализа тенденций климатических параметров, определяющих временную изменчивость ледниковых систем, выбран период 1949–2014 гг. (длина выборки $N = 66$, данные UDel). Нижняя временная граница определяется максимальной плотностью наблюдений за этот период в данном регионе. Для каждой из выбранных горных областей с ледниковыми системами вычислены: временные ряды средних летних температур (в дальнейшем T_{sum}), °C; годовые суммы твёрдых осадков (в дальнейшем Z_{sol}), мм/год; значения средних ошибок интерполяции температуры $\pm T_{cv}$ (°C) и твёрдых осадков $\pm Z_{cv}$, мм/год. Значок «±» в обозначениях ошибок интерполяции указывает

на необходимость вычитания или прибавления данной величины к среднему значению для получения максимального разброса соответствующей величины, обусловленного ошибкой интерполяции. В предположении нормальности распределения ошибок необходимо эти ошибки уменьшить в 2/3 раза. В табл. 2 представлены результаты статистического анализа временных рядов указанных величин. Здесь и далее по тексту приняты следующие обозначения: \bar{T}_{sum} и \bar{Z}_{sol} – средние за выбранный период значения летней температуры и твёрдых осадков; $\pm \bar{T}_{cv}$ и $\pm \bar{Z}_{cv}$ – средние ошибки интерполяции; trT_{sum} и trZ_{sol} – линейные тренды летней температуры и твёрдых осадков за период 1949–2014 гг.

Отметим, что величины $\pm \bar{Z}_{cv}$ и $\pm \bar{T}_{cv}$ зависят от расстояния до ближайших станций и минимальны в ячейках сетки с метеостанциями (здесь

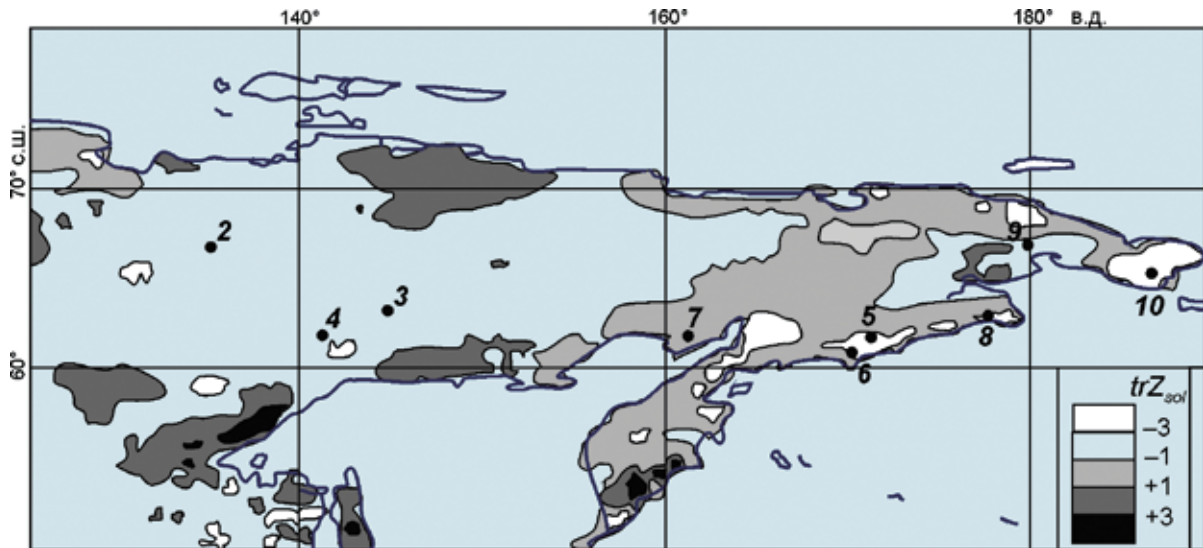


Рис. 1. Значения величины тренда твёрдых осадков trZ_{sol} (мм/год) для Северо-Востока России за 1949–2014 гг. Значения в диапазоне $-1 < trZ_{sol} < +1$ статистически не значимы. Ледниковые системы пронумерованы в соответствии с табл. 1
Fig. 1. The value of the trend of solid precipitation trZ_{sol} in mm/year for the Northeast of Russia for 1949–2014. Values are in the range $-1 < trZ_{sol} < +1$ insignificant. The glacial systems are numbered according to the Table 1

для сумм осадков величина ошибки находится в пределах менее 20–25% величины осадков). Из табл. 2 видно, что твёрдые осадки убывают по мере удаления ледниковых систем от тёплого океанского побережья в сторону расположения зимнего сибирского антициклона. Летние температуры, наоборот, возрастают с удалением от более холодного океана и изменяются с высотой рельефа.

Тренды твёрдых осадков и летней температуры.

Пространственное распределение линейных трендов твёрдых осадков приведено на рис. 1. К востоку от 150–155° в.д., включая северную часть Камчатки, преобладают значимые отрицательные тренды, а к западу – незначимые положительные. Исключение составляет район значимого роста снега на Чукотке вокруг заливов Анадырь и Креста. Максимальных значений положительные тенденции роста снежного покрова достигают на западном побережье Охотского моря, на Сахалине и юге Камчатки, где тренды достигают рекордно-го максимума – 10 мм/год. Сопоставление поля тренда твёрдых осадков, полученных по данным архива UDel, с аналогичными данными для 25 метеостанций данного региона, приведёнными в работах [6–8], показывает, что их различие лежит в пределах $\pm 25\%$, что соответствует ошибке интерполяции осадков в точках наблюдений (при этом необходимо учитывать, что первые оцениваются по более длинному ряду наблюдений).

Для температурных трендов характерно преобладание значимого положительного роста летней температуры для всей территории. Исключение составляет небольшой район на крайнем северо-востоке (Чукотский п-ов), где тренд летней температуры отсутствует (незначимый, положительный – 0,006 °C/год).

Сопоставление трендов осадков и температуры в табл. 2 показывает, что положительные тренды летней температуры над ледниковыми системами Северо-Востока России (к востоку от 140°) соответствуют в большинстве случаев отрицательным трендам твёрдых осадков. Таким образом, обе тенденции направлены на сокращение массы ледников: увеличения их таяния и уменьшения аккумуляции. Летнее похолодание, однако, сопровождается тенденцией увеличения твёрдых осадков, на что указывает пример юго-востока Чукотского нагорья (залив Креста). Эти факты позволяют сделать вывод, что над ледниковыми системами данного региона летние потепления (похолодания) в многолетнем ходе сопровождаются тенденциями уменьшения (увеличения) твёрдых осадков, возможно, за счёт сокращения (увеличения) периода их выпадения. В подтверждение этого вывода говорит то, что для сумм осадков за фиксированный период (октябрь–апрель) такие закономерности не наблюдаются, а тренды незначимы.

Методика оценки эволюции ледниковых систем и результаты

Водный баланс поверхности ледника B на фиксированной высоте X можно выразить формулой $B = C - A$, где C – аккумуляция, A – абляция (таяние). Величину абляции можно вычислить по эмпирической формуле, которая подходит для данного региона [9]:

$$A = \alpha(T_X + 7)^3, \text{ мм/год}, \quad (1)$$

где T_X – средняя летняя температура воздуха на высоте X в пределах поверхности ледника, °C; $\alpha = 1 \text{ мм/}^\circ\text{C}^3$ – коэффициент пропорциональности, который в дальнейшем будем опускать; в наших обозначениях $T_X = T_{sum} - \gamma(X - h)$, где γ – вертикальный градиент температуры, равный $0,006 \text{ }^\circ\text{C/м}$ и соответствующий градиенту, использованному в нашем архиве для экстраполяции температуры для разных высот; h – высота, для которой определена T_{sum} .

Принимая допущения, что, во-первых, величина аккумуляции пропорциональна твёрдым осадкам (из архива) и, во-вторых, соотношение между ними постоянно по времени для данной ледниковой системы, зададим её формулой, аналогичной той, которая принята в гляциологии для зависимости аккумуляции от осадков на ледниках:

$$C = KZ_{sol}. \quad (2)$$

где K – коэффициент пропорциональности, определяемый нами эмпирически для каждой ледниковой системы ($K = \text{const}$, обычно равен или больше единицы, а в гляциологической формуле он называется коэффициент концентрации).

Величина Z_{sol} представляет собой интерполированную между метеостанциями величину твёрдых осадков над районом оледенения, поэтому факторы, обуславливающие различия коэффициента K и превышение аккумуляции над твёрдыми осадками, взятыми из архива, могут быть следующие:

1) фактор орографических вертикальных движений [10–12], приводящий к значительному росту осадков в горах, особенно на склонах, наветренных по отношению к горизонтальной составляющей скорости ветра над пограничным слоем атмосферы в дни с осадками (может увеличивать значения архивных осадков в несколько раз);

2) фактор перераспределения снега: концентрация снега в понижениях рельефа на ледни-

ках за счёт лавин, метелевого переноса, сноса со склонов; коэффициент концентрации различается для типов ледников и ледниковых систем (увеличивает слой твёрдых осадков в 1,5–2 раза);

3) увеличение периода выпадения твёрдых осадков над ледниковыми системами по сравнению с аналогичным периодом на соседних метеостанциях;

4) фактор выбора исходного архива: различный набор метеостанций с разными временными рядами и разные методы интерполяции в узлах регулярной сетки.

При использовании формул (1) и (2) уравнение водного баланса ледников для высоты X примет следующий вид:

$$B = KZ_{sol} - [T_{sum} - 0,006(X - h) + 7]^3. \quad (3)$$

Если в формуле (3) для X принять условие $X = H_{ELA}$ (высота границы питания), то из определения высоты границы питания как высоты, где $B = 0$, получим формулу

$$KZ_{sol} = [T_{sum} - 0,006(H_{ELA} - h) + 7]^3. \quad (4)$$

Решаем уравнение (4) относительно H_{ELA} (\bar{H}_{ELA}) и получаем выражение

$$H_{ELA} = h + (T_{sum} + 7 - kz)/0,006, \quad (5)$$

где $z = (Z_{sol})^{1/3}$ и $k = K^{1/3}$.

Если предположить, что $K = \text{const}$ по времени для каждой ледниковой системы (*предположение 1*), то формула (5) линейна относительно T_{sum} и z . С учётом того, что функция $z = (Z_{sol})^{1/3}$ почти линейна по отношению к Z_{sol} с точностью $\pm 2\%$ в области изменчивости данной величины (50–400 мм), можно полагать, что $\bar{z} = \bar{Z}_{sol}^{1/3} \approx \bar{Z}_{sol}^{1/3}$. Горизонтальная черта над символом означает осреднение по времени за любой период соответствующей величины (*предположение 2*). В результате сделанных предположений получаем формулу для средних величин:

$$\bar{H}_{ELA} = h + (\bar{T}_{sum} + 7 - k\bar{z})/0,006. \quad (6)$$

В силу допущения постоянства K для всего периода наблюдения, используя формулу (6), можно вычислить его по средним \bar{T}_{sum} и \bar{Z}_{sol} за 1949–2014 гг.:

$$K = k^3 = [\bar{T}_{sum} + 7 - 0,006(\bar{H}_{ELA} - h)]^3 / \bar{Z}_{sol}. \quad (7)$$

Из формулы (7) следует, что для получения K требуется задание величины \bar{H}_{ELA} с привязкой к

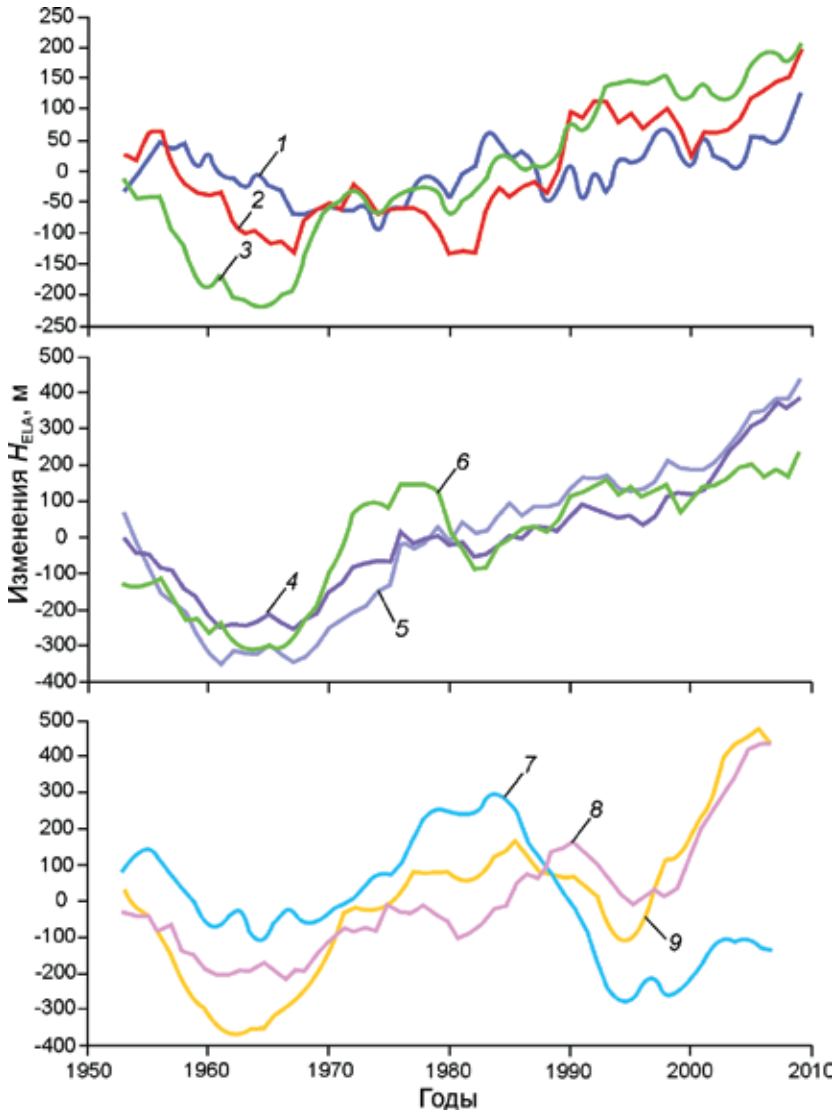


Рис. 2. Пример расчёта временных рядов отклонений высоты границы питания ΔH_{ELA} (м) по 10-летним скользящим средним для девяти ледниковых систем Северо-Востока России:

1 – хребет Орулган; 2 – хребет Черского, массив Буордах; 3 – горы Сунтар-Хаята; 4 – Корякского нагорья (север); 5 – Корякского нагорья (юг); 6 – п-ов Тайгонос; 7 – юго-восток Чукотского нагорья (залив Креста); 8 – северо-восток Корякского нагорья; 9 – Чукотский полуостров; нулевое значение ΔH_{ELA} соответствует средней высоте границы питания

Fig. 2. Calculation example of time series of the equilibrium line altitude H_{ELA} deviations in meters (by 10-year moving averages) for the glacial systems of North-East of Russia.

1 – Orulgan Range; 2 – Chersky Range, Buordakh Massif; 3 – Suntar-Hayata Range; 4 – Koryak Highlands (North); 5 – Koryak Highlands (South); 6 – Taigonos Peninsula; 7 – South-East of the Chukchi Upland (Cross Bay); 8 – North-East of the Koryak Highlands; 9 – Chukchi Peninsula; the zero value of ΔH_{ELA} corresponds to the mean equilibrium line altitude

определённому году или периоду лет. Для современного (базового) периода \bar{H}_{ELA} задаётся на период 1949–2014 гг. (приведена в табл. 1). Теперь, когда K найдено, переходим путём вычитания формул (5) и (6) к формуле для отклонений H_{ELA} от средней – ΔH_{ELA} :

$$\Delta H_{ELA} = (\Delta T_{sum} - k\Delta z)/0,006, \quad (8)$$

где $\Delta H_{ELA} = H_{ELA} - \bar{H}_{ELA}$; $\Delta T_{sum} = T_{sum} - \bar{T}_{sum}$; $\Delta z = z - \bar{z}$.

Согласно формуле (8), зависимость временных изменений H_{ELA} от изменений летней температуры и суммы твёрдых осадков для каждой ледниковой системы определяется только одним параметром – величиной k . В силу линейности формулы (8) при анализе изменений высоты границы питания для величин T_{sum} и z (последняя ха-

рактеризует твёрдые осадки) можно использовать как ежегодные данные, так и скользящие средние. Скользящие средние позволяют убрать ежегодные колебания высоты границы питания, получающиеся из расчётов и не отражающие реальную картину её динамики на ледниках. Предпочтительнее использовать в формуле (8) сглаженные (10-летние средние) величины T_{sum} и z . Мы выбрали 10-летнее сглаживание, чтобы учесть климатические изменения последних десятилетий и нивелировать разброс в измерениях твёрдых осадков до введения в 1953 г. осадкомеров Третьякова.

На рис. 2 показан пример расчёта временных рядов ΔH_{ELA} по формуле (8) для 10-летних скользящих средних T_{sum} и z для девяти ледниковых систем Северо-Востока России. Кривая для гор Бырранга (№ 1) не приводится из-за малых значений

Таблица 3. Результаты расчётов прогноза изменений высоты границы питания и средние значения аккумуляции на ледниковых системах Северо-Востока России по предложенному алгоритму (названия ледниковых систем 1–10 см. табл. 1)*

Параметры	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Коэффициент пропорциональности K	0,9	5,8	8,5	9,0	5,4	6,7	11,0	6,5	5,1	5,4
$k(k = K^{1/3})$	1,0	1,8	2,0	2,1	1,8	1,9	2,2	1,9	1,7	1,8
Средняя аккумуляция \bar{C} , мм	170	370	750	920	1200	1430	2750	1540	1540	2050
Значение тренда высоты границы питания trH , м/год	0,6	1,2	3,3	6,6	8,7	11,9	8,3	-3,8	8,1	10,2
Стандартная ошибка тренда $\pm sse$, м/год	0,2	0,3	0,5	0,5	0,7	0,9	0,8	1,2	0,8	1,1
Прогноз на 2034 г. относительно 1981 г.: ΔH_{ELA} , м	30	70	180	350	460	630	400	-200	430	540
Ошибка прогноза $\pm \Delta_p$, м	12	17	28	25	36	46	40	63	41	60
r , %	107	175	100	67	42	33	36	43	43	8

*Все тренды trH в табл. 3 значимы ($p < 5\%$); $\Delta H_{ELA} = 0$ за 1981 г. согласно линейной регрессии; ΔH_{ELA} за 2034 г. рассчитан по формуле (9).

величины ΔH_{ELA} (соответственно нумерация кривых смещается на единицу). Из рис. 2 следует, что на Чукотке изменения ΔH_{ELA} носят квазициклический характер с периодом порядка 30 лет. Поскольку климат рассматриваемых ледниковых систем морской, причину таких колебаний следует искать в изменениях SST (стандартная аббревиатура для температуры поверхности моря) северной части Тихого океана на фоне планетарного потепления атмосферы во второй половине XX и начале XXI вв. Рост осадков в районе заливов Креста и Анадырского и связанное с ним понижение высоты границы питания с середины 1990-х до начала 2000-х годов также, возможно, связан с изменением SST в районе Берингова моря.

Анализ аналогичных графиков для других ледниковых систем показывает, что за период 1949–2014 гг. имел место общий для всех ледниковых систем абсолютный минимум высоты H_{ELA} в 1960–1970 гг. и общий абсолютный максимум в 2000–2014 гг. (кроме ледниковой системы № 8 – юго-восток Чукотского нагорья в районе залива Креста, где наблюдаются значимый рост осадков и падение температуры).

Тенденции развития изучаемых ледниковых систем в будущем. По рассчитанному ряду ΔH_{ELA} (кривые на рис. 2) в первом приближении можно построить следующее линейное регрессионное уравнение, с помощью которого мы попытаемся оценить прогноз на 20 лет в будущее относительно 2014 г.:

$$\Delta H_{ELA} = trH(t - t_m), \quad (9)$$

где trH – линейный тренд, м/год; t – номер года; t_m – середина интервала $[Y_b, Y_f]$, которому соот-

ветствует нулевое значение отклонения ΔH_{ELA} ; Y_b и Y_f – соответственно начальный и конечный год интервала; $t_m = Y_b + (Y_f - Y_b)/2$ (в нашем случае это 1981 г.).

При расчёте коэффициента регрессии trH обычно определяется его стандартная ошибка – $\pm sse(trH)$, которая позволяет оценить ошибку прогноза заблаговременности p (лет) – $\pm \Delta_p$:

$$\pm \Delta_p = \pm sse(trH) [p + (Y_f - Y_b)/2]. \quad (10)$$

В нашем случае для интервала сглаженных величин (1953–2009 гг.) ошибка прогноза на 2034 г. составляет: $\pm \Delta_p = \pm sse(trH)52,5$. Приведём алгоритм для расчёта эволюции (тренды и прогноз) ΔH_{ELA} :

1) по совокупности всех имеющихся данных за исследуемый период (данные Каталога ледников и совокупности статей) задание для области ледниковой системы величины \bar{H}_{ELA} ;

2) вычисление 10-летних скользящих средних для T_{sum} и Z_{sol} и по этим новым рядам средних \bar{T}_{sum} и \bar{Z}_{sol} ;

3) расчёт K по формуле (7) и $k = K^{1/3}$.

4) вычисление ряда $z = (Z_{sol})^{1/3}$ и \bar{z} ;

5) по формуле (8) вычисляем ряд ΔH_{ELA} по 10-летним скользящим средним T_{sum} и z ;

6) вычисление для выражения (9) коэффициента линейной регрессии trH и его ошибки sse ;

7) вычисление прогноза заблаговременности p для ΔH_{ELA} по формуле (9) и величины ошибки $\pm \Delta_p$ по формуле (10).

Результаты расчётов, выполненных по заданному алгоритму, параметров и линейных трендов изменения высоты границы питания десяти ледниковых систем приведены в табл. 3.

Отметим, что все тренды оказались значимыми по f -распределению с уровнем значимости менее 5%. Оценка ошибок прогноза, за исключением систем № 1 и 8, находится в пределах $\pm 25\%$ прогнозируемой величины, что вполне приемлемо для ледниковых систем с учётом значительного разброса высот границы питания при определении средних для территории величин (колеблется в пределах $\pm 50-500$ м в зависимости от средней высоты системы). В табл. 3 приведена также величина $r = 100\%trT/(0,006trH)$, где trT – тренд 10-летней скользящей средней температуры (немного отличается по величине от тренда в табл. 2 и везде значим). Величина r характеризует долю вклада температурного тренда в тренд ΔH_{ELA} . Поскольку, согласно формуле (8), тренды температуры и осадков противоположны по своему действию на изменения высоты границы питания, значения $r < 100\%$ означают противоположные по знаку тренды T_{sum} и kz , а значения $r > 100\%$ – тренды одного знака. В последнем случае доля тренда осадков r составляет 100%, а величина $r/(r - 100\%)$ показывает, во сколько раз доля тренда T_{sum} больше доли тренда осадков kz .

Из данных табл. 3 о величине r следует, что основной вклад в изменение состояния прибрежных ледниковых систем (системы 5–10) вносят изменения твёрдых осадков, а для континентальных систем, наоборот, тенденции изменения H_{ELA} обусловлены изменением летней температуры воздуха. Отметим, что тренды летней температуры и твёрдых осадков во всех случаях, кроме хр. Орулган, действуют в одном направлении по изменению высоты границы питания (либо оба увеличивают H_{ELA} , либо оба уменьшают). На хр. Орулган рост температуры повышает величину H_{ELA} , а рост осадков, наоборот, понижает.

Прогнозируемые значения подъёма высоты границы питания по отношению к 1981 г. колеблются от 30 до 600 м в зависимости от сочетания масштаба изменений температуры воздуха, сумм твёрдых осадков, а также высот рельефа. Максимум подъёма приходится на ледниковые системы Корякии и Чукотского полуострова, минимум – на горы Бырранга и хр. Орулган.

С точки зрения оценки точности прогноза важна оценка чувствительности трендов и прогнозистических значений ΔH_{ELA} к ошибкам интер-

поляции исходных данных и данных наблюдений \bar{H}_{ELA} в формуле (8). По нашему мнению, ошибки интерполяции не влияют на тренды исходных данных T_{sum} и z , поскольку: а) тренды величин ошибок T_{cv} и Z_{cv} малы по сравнению с трендами T_{sum} и z (в 5–10 раз меньше) и б) ряды этих ошибок не учитывают знак самой величины (берутся по модулю) и уже учтены в оценке стандартной ошибки тренда sse . В силу этих аргументов мы принимаем, что ошибки расчёта ΔH_{ELA} вызваны только ошибками вычисляемого по формуле (7) коэффициента k . Согласно этой формуле, коэффициент зависит от трёх величин: двух, вычисляемых по архиву \bar{T}_{sum} и \bar{z} и имеющих ошибки интерполяции $\pm \bar{T}_{cv}$ и $\pm \bar{Z}_{cv}$, и величины \bar{H}_{ELA} , которая задаётся по данным наземных или спутниковых наблюдений. Зададим величину ошибки определения \bar{H}_{ELA} с учётом её высокой пространственной изменчивости в ледниковых системах $\Delta H = \pm 100$ м. Обозначим ошибки расчёта коэффициента k , вызванные ошибкой температуры Δk_T , ошибкой осадков Δk_z и ошибкой Δk_H определения \bar{H}_{ELA} . Тогда из формулы (7) получим следующие выражения для ошибок k :

$$\Delta k_T = \pm \bar{T}_{cv} / \bar{z}; \Delta k_z = -(\pm k \Delta \bar{z} / \bar{z}); \Delta k_H = -(\pm \Delta_H 0,006 / \bar{z}),$$

где $\Delta \bar{z} = 0,5 [(\bar{Z}_{sol} + \bar{Z}_{cv})^{1/3} - (\bar{Z}_{sol} - \bar{Z}_{cv})^{1/3}]$, а знак минус во втором и третьем выражении означает, что изменение указанных величин имеет знак, противоположный изменению исходных величин.

Сделаем предположение, что ошибки не коррелированы между собой. Тогда при условии совпадения знаков ошибок в формуле (8) по влиянию на конечный результат максимально возможная (по модулю) ошибка Δ_{max} расчёта величины изменения высоты границы питания ледниковых систем за период τ составит:

$$\Delta_{max} = \pm (|\Delta_1| + |\Delta_2| + |\Delta_3|),$$

где $\Delta_1 = \tau \Delta k_T trz$; $\Delta_2 = \tau \Delta k_z trz$ и $\Delta_3 = \tau \Delta k_H trz$ ($\tau = 53$ года в нашем случае прогноза на 2034 г.); trz – тренд величины z (вычисляем на этапе пятого алгоритма, рассмотренного раньше); Δ_1 , Δ_2 и Δ_3 – ошибки прогноза изменения высоты границы питания, вызванные ошибками \bar{T}_{sum} , \bar{z} и \bar{H}_{ELA} соответственно.

Результаты расчётов указанных величин, приведённые в табл. 4, показывают, что данный метод

Таблица 4. Оценка ошибок значений k и изменений высоты границы питания за 1981–2034 гг., обусловленных ошибками интерполяции и ошибкой определения \bar{H}_{ELA}

Параметры*	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k	1,0	1,8	2,0	2,1	1,8	1,9	2,5	1,9	1,7	1,8
$\Delta k_T/k, \%$	15	10	11	12	6	5	7	10	7	5
$\Delta k_z/k, \%$	-11	-9	-10	-15	-13	-16	-9	-20	-13	-17
$\Delta k_H/k, \%$	-11	-7	-7	-6	-5	-5	-4	-5	-5	-5
$\pm \Delta_1, \text{ м}$	0	5	0	-14	-15	-19	-20	11	-17	-27
$\pm \Delta_2, \text{ м}$	0	-5	0	17	35	67	24	-22	32	85
$\pm \Delta_3, \text{ м}$	0	-3	0	7	15	22	12	-6	13	24
$\pm \Delta_{\text{max}}, \text{ м}$	0	13	0	38	65	109	56	40	62	137
$\Delta_{\text{max}}/\Delta H_{ELA}, \%$	0	19	0	11	14	17	13	-20	15	26

*Параметры в первой (левой графе) см. в тексте. Знак минус для ошибок в данной таблице означает, что знак изменения конечной величины противоположен знаку исходной.

расчёта изменения высоты границы питания мало чувствителен к небольшим флуктуациям (ошибкам) исходных параметров, определяющих коэффициент k в формуле (8). Действительно, относительная максимально возможная ошибка составляет 26% величины прогнозного изменения ΔH_{ELA} за 53 года (в среднем для всех систем 13%) при том, что вероятность совпадения всех трёх ошибок одного знака составляет 0,25. В этом случае можно предположить, что средняя общая ошибка изменения высоты границы питания, обусловленная ошибкой расчёта k , лежит в пределах $0,5-100\% \Delta_{\text{max}}/\Delta H_{ELA}$, т.е. в среднем для всех ледниковых систем в районе равна 6–13%.

Наименее чувствителен прогноз высоты границы питания к вариациям средней высоты границы питания, наиболее – к $\overline{Zc\bar{v}}$ (так, ошибка прогноза ΔH_{ELA} за счёт $\Delta H = \pm 100$ м составляет в среднем 20% общей ошибки Δ_{max} , а ошибки за счёт $\overline{Zc\bar{v}}$ – 50%). В абсолютном выражении ошибка в определении средней высоты границы питания в 100 м вызывает ошибку ΔH_{ELA} за 50 лет, в среднем равную 10 м (максимум 24 м для Чукотского полуострова). Максимальные ошибки прогноза изменения высоты границы питания над Чукотским полуостровом обусловлены максимальным вкладом тренда осадков в её изменения (см. табл. 3).

В табл. 5 приводится сравнение фактических и расчётных данных изменений ΔH_{ELA} за различные периоды времени, полученных с помощью предлагаемой в статье методики расчёта. Под фактическими изменениями здесь под-

Таблица 5. Сопоставление данных об изменениях H_{ELA} , рассчитанных по кривым на рис. 2, и данных, полученных из различных источников

Области ледниковых систем	Период изменения, годы	Источники*	Изменения $H_{ELA}, \text{ м}$		Суммарная ошибка $\pm \Delta_{\text{max}}, \text{ м}$
			фактические	расчётные	
Хр. Орулган	1970–2003	Кл	50	70	10
Хр. Черского, массив Буордах			150	110	0
Сунтар-Хаята	1950–2003	С	80	120	40
Корякское нагорье (Север)	1950–2000	Кл	75	100	60
Корякское нагорье (Юг)			130	100	100
П-ов Тайгонос			1970–2000	90	160
Чукотское нагорье (залив Креста)	1965–2000	С	-260	-200	30
Северо-восток Корякского нагорья			110	200	40
Чукотский полуостров			1970–2000	120	300

*Кл – климатические данные [13]; С – спутниковые данные [6]; суммарная ошибка $\pm \Delta_{\text{max}}$ рассчитана для периода изменения во второй колонке.

разумеваются оценочные разности величины H_{ELA} для разных временных отрезков исходного ряда, полученные из разных источников: данные Каталога ледников, спутниковые данные, результаты полевых наблюдений по отдельным статьям. Величины H_{ELA} , полученные по спутниковым данным, определялись с помощью ASTER GDEM с использованием метода Гефера–Куровского, а H_{ELA} по климатическим данным – как высота пересечения балансовых кривых, построенных по данным метеостанций с применением эмпирических формул расчёта абляции и аккумуляции.

Данные табл. 5 показывают, что знаки и порядки фактических и расчётных величин совпадают с учётом оценочного характера фактических данных изменений H_{ELA} . Слово «оценочный» означает: а) большие различия фактических H_{ELA} внутри одной ледниковой системы (порядки этих различий составляет $\pm 50-500$ м и зависят от высоты ледниковой системы); 2) различия типов и площадей ледников системы, что влияет на расчёт средней величины; 3) различия во

времени определения H_{ELA} для ледников разных частей системы (может составлять более 10 лет); 4) различие методов определения этой величины для разных систем и отдельных ледников. Таким образом, точный расчёт фактической величины H_{ELA} требует учёта всех этих различий и делает эту задачу трудно выполнимой в рамках данной статьи. В этом смысле расчётные данные изменений ΔH_{ELA} ближе к истинным, чем оценочные фактические изменения.

Заключение

В настоящей работе предлагается методика расчёта высоты границы питания для ледниковых систем как одной из основополагающей характеристики режима ледников. Регион Северо-Востока России исследован мало, экспедиции туда затруднены из-за очень высоких транспортных расходов (нет дорог) и сложного доступа к ледникам. Поэтому расчётные методы пока имеют важное значение для оценки состояния ледниковых систем и возможности прогноза их эволюции в ближайшем будущем. По многолетним рядам отклонений высоты границы питания H_{ELA} установлены периоды минимального и максимального положения H_{ELA} для разных ледниковых систем, а также линейные тренды этих рядов, что позволило оценить тенденции изменения H_{ELA} в будущем с использованием метода линейной регрессии. К достоинствам рассматриваемого в статье подхода к исследованию ледниковых систем можно отнести следующие аспекты.

1. Благодаря пространственно-временному объективному анализу, выполняемому при получении сеточных данных о температуре и осадках, предлагаемая методика позволяет учитывать при изучении временных рядов высоты границы

питания весь массив имеющихся данных вокруг исследуемой ледниковой системы, а также детализировать пространственное распределение метеорологических параметров в её пределах.

2. Методика устанавливает связь между сеточными значениями твёрдых осадков и аккумуляцией как для всей ледниковой системы, так и для её отдельных частей. Она позволяет использовать любые архивные данные в узлах регулярной сетки, в том числе данные реанализа, которые, однако, требуют предварительной оценки соответствия данных об осадках данным метеорологической сети.

3. Предлагаемая методика даёт возможность оценивать межгодовые изменения (колебания) высоты границы питания (с учётом периода сглаживания). Так, для ледниковых систем Северо-Востока России установлены периоды минимальных (1960–1970 гг.) и максимальных значений высоты границы питания (2000–2014 гг.), за исключением юго-востока Чукотского нагорья (минимум – 1995–2005 гг., максимум – 1980–1990 гг.).

4. Полученные в результате применения методики ряды ΔH_{ELA} позволяют выполнять нелинейный прогноз этой величины, более точный и надёжный, чем используемый в гляциологии линейный прогноз, особенно при использовании данных IPCC прогнозов для температуры и осадках. Результаты оценок ошибок показывают, что данный метод расчёта изменения H_{ELA} слабо чувствителен к малым флуктуациям (ошибкам) исходных параметров.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке РФФИ, грант № 16-05-00349 а.

Acknowledgments. This study was supported by the RFBR, grant № 16-05-00349 а.

Литература

1. Жильцова Е.Л., Анисимов О.А. О точности воспроизведения температуры и осадков на территории России глобальными климатическими архивами // Метеорология и гидрология. 2009. № 10. С. 79–89.
2. Электронный ресурс: http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/download.html.
3. Каталог ледников СССР. Л.: Гидрометеиздат, 1965–1982.

References

1. Zhiltsova E.L., Anisimov O.A. On the accuracy of temperature and precipitation reproduction in Russia by global climate archives. *Meteorologiya i gidrologiya*. Meteorology and Hydrology. 2009, 10: 79–89. [In Russian].
2. Internet source: http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/download.html.
3. *Katalog lednikov SSSR*. USSR Glacier Inventory. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1965–1982. [In Russian].

4. Электронный ресурс: Материалы исследований Р.В. Седова, 2009. www.webgeo.ru/index.php?r=50&id=687.
5. Котляков В.М., Хромова Т.Е., Зверкова Н.М., Чернова Л.П., Носенко Г.А. Две новые ледниковые системы на северо-востоке Евразии // ДАН. 2011. Т. 437. № 1. С. 108–113.
6. Ананичева М.Д. Оценка площадей, объёмов и высот границы питания ледниковых систем Северо-Востока России по космическим снимкам начала XXI в. // Лёд и Снег. 2014. № 1 (125). С. 35–47.
7. Ананичева М.Д., Карпачевский А.М. Современное состояние ледников Чукотского и Колымского нагорий и прогноз эволюции ледниковых систем Чукотского нагорья // Фундаментальная и прикладная климатология. 2016. Т. 1. С. 64–83.
8. Мавлюдов Б.Р., Ананичева М.Д. Ледники северного массива гор Сунтар-Хаята: современное состояние и динамика с конца 1950-х годов. // Лёд и Снег. 2016. Т. 56. № 3. С. 345–357.
9. Корейша М.М. Современное оледенение хребта Сунтар-Хаята // М.: Изд-во АН СССР, 1963. 169 с.
10. Михайлов А.Ю. Роль орографических вертикальных движений в формировании климатического поля летних осадков. // Изв. АН СССР. Сер. геогр. 1985. № 5. С. 96–103.
11. Михайлов А.Ю. Расчет интегрального влияния рельефа на величину вертикальной скорости ветра // Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана. 1986. № 5. С. 543–546.
12. Ананичева М.Д., Капустин Г.А., Михайлов А.Ю. Ледники Мейныпильгынского хребта: современное состояние и прогноз эволюции ледниковых систем // Лёд и Снег. 2012. № 2 (118). С. 40–50.
4. Internet source: *Materialy issledovaniy R.V. Sedova*. Research materials by R.V. Sedov. 2009. www.webgeo.ru/index.php?r=50&id=687. [In Russian].
5. Kotlyakov V.M., Khromova T.E., Zverkova N.M., Chernova L.P., Nosenko G.A. Two new glacial systems in the Northeast of Eurasia. *Doklady Akademii nauk*. Proc. of the Academy of Sciences. 2011, 437 (1): 108–113. [In Russian].
6. Ananicheva M.D. Assessment of area, volume and ELA of glacial systems in Northeast Russia from satellite images of the beginning of XXI century. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2014, 1 (125): 35–47. [In Russian].
7. Ananicheva M.D., Karpachevsky A.M. The current state of the glaciers of the Chukchi and Kolyma highlands and the projection of the evolution of the Chukchi Highland glacier systems. *Fundamental'naya i prikladnaya klimatologiya*. Fundamental and applied climatology. 2016, 1: 64–83. [In Russian].
8. Mavlyudov B.R., Ananicheva M.D. Glaciers of the northern massif of the Suntar-Hayata Mountains: current state and dynamics since the end of 1950s. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2016, 56 (3): 345–357. [In Russian].
9. Koreisha M.M. *Sovremennoe oledenenie khrebt Suntar-Khayata*. Present-day glaciation of the Suntar-Hayata Range. Moscow: USSR Academy of Sciences, 1963: 169 p. [In Russian]
10. Mikhailov A.Yu. Role of orographic vertical movements in the formation of the summer precipitation climate pattern. *Izvestiya AN SSSR. Seriya geograficheskaya*. Proc. of the USSR Academy of Sciences. Geographic series. 1985, 5: 96–103. [In Russian].
11. Mikhailov A.Yu. Calculation of the integral influence of topography on the magnitude of vertical wind speed. *Izvestiya AN SSSR. Fizika atmosfery i okeana*. Proc. of the USSR Academy of Sciences. Physics of the atmosphere and ocean. 1986, 5: 543–546. [In Russian].
12. Ananicheva M.D., Kapustin G.A., Mikhaylov A.Yu. Glaciers of the Mainypilgynsky Range: current state and development forecast of glacier systems. *Led i Sneg*. Ice and Snow. 2012, 2 (118): 40–50. [In Russian].