

Инвентаризация ледников Восточного Саяна по материалам космических съёмок© 2017 г. Э.Ю. Осипов^{1*}, О.П. Осипова², Е.В. Клевцов³¹Лимнологический институт СО РАН, Иркутск, Россия; ²Институт географии имени В.Б. Сочавы СО РАН, Иркутск, Россия;³Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

*eduard@lin.irk.ru

Inventory of glaciers in the Eastern Sayan on the basis of space surveysE.Y. Osipov^{1*}, O.P. Osipova², E.V. Klevtsov¹Limnological Institute, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia;²V.B. Sochava Institute of Geography, Siberian Branch, Russian Academy of Sciences, Irkutsk, Russia;³Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

*eduard@lin.irk.ru

Received October 18, 2016

Accepted March 23, 2017

Keywords: Eastern Sayan, GIS, glacier changes, inventory, Landsat, small glaciers.**Summary**

Small glaciers (areas smaller 1 km²) are the most numerous in most mountainous and glacial regions of the Earth, but their responses to the present-day climate change are still to be investigated. The paper presents results of the new inventory of small inter-continental glaciers located in the Eastern Sayan (South of Eastern Siberia). The previous (1950) glacier inventory was made from data of aerial photography carried out in the middle of the 20th century (USSR Glacier Inventory, KJI 1950). A more complete inventory of the East Sayan glaciers for the state of 2000 (KJI 2000) had been performed using the multichannel space images (Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM+) of 2000 and 2001, and the Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) digital elevation model (DEM). In addition, some glaciers from the Inventory KL 1950 were re-mapped on the basis of the Landsat images (TM, ETM+, 1986-2011) for years 1950, 1990 and 2010. The glacier outlines, determined on the test site from images of medium (Landsat) and high (World View-1) satellite resolution, were compared that confirmed that errors of mapping of small glaciers did not exceed 15%. The KL 2000 contains data on 172 glaciers with a total area of 16.6±1.9 km². Glacier sizes are from 0.02 to 1.37 km². For 1950–2000, the total area of the East Sayan glaciers had decreased by 59% (0.40% per a year). In 1990–2000, the glaciers decreased the most rapidly (by an order of magnitude faster as compared to the period of 1950–1990.). In 2000–2010, the area of glaciation slightly increased (by 4%) owing to formation of very small glaciers (area smaller 0.5 km²). On the whole, changes in glacier areas in the years 1950–2010 are in the good agreement with changes in amounts of winter precipitation and summer temperatures. In addition to regional climatic factors, there are also some local factors related to the topography and microclimate of individual glaciers which do also influence on the dynamics of small glaciers.

Citation: Osipov E.Y., Osipova O.P., Klevtsov E.V. Inventory of glaciers in the Eastern Sayan on the basis of space surveys. *Led i Sneg. Ice and Snow*. 2017. 57 (4): 483–497. [In Russian]. doi: 10.15356/2076-6734-2017-4-483-497

Поступила 18 октября 2016 г.

Принята к печати 23 марта 2017 г.

Ключевые слова: Восточный Саян, ГИС, изменения ледников, каталог, Ландсат, ледники.

С использованием космических снимков Landsat и цифровой модели SRTM составлен новый ГИС-каталог ледников Восточного Саяна по состоянию на 2000 г.; выполнен статистический анализ морфометрических характеристик ледников. По отдельным выборкам ледников реконструированы их контуры на конец малого ледникового периода (~1850 г.), а также на ~1990 и ~2010 гг. Проанализированы изменения площади ледников за период 1850–2010 гг. и оценена роль температуры воздуха и осадков в динамике оледенения.

Введение

С конца XIX в., когда началось систематическое изучение текущих изменений ледников, получен огромный массив информации как об изменениях ледников (их площади, объёмов и протяжённости) во времени, так и об их распре-

делении в пространстве. Наиболее полная информация собрана о ледниках Альп и Скандинавии, для которых имеются самые длинные ряды наблюдений. Однако реакция внутриконтинентальных ледниковых систем на современные изменения климата до конца не исследована. Особенно это касается наиболее многочисленных ледников

площадью менее 1 км². Таких ледников много на юге Восточной Сибири (на Восточном Саяне, в горах Прибайкалья, в Кодарский хребте).

Ледники Восточного Саяна, наиболее многочисленные в горах юга Восточной Сибири, начали изучать ещё в середине XIX в. [1]. По материалам аэрофотосъёмки 1940–50-х годов каталогизировано 105 ледников общей площадью 30,3 км² [2], однако морфометрические характеристики были приведены только для 83 ледников площадью более 0,1 км². Существенные недостатки этого Каталога ледников (КЛ1950) – отсутствие пространственной привязки ледников и оценок погрешностей их измерения. Кроме того, около 1/3 ледников не были обеспечены качественными аэрофотоснимками (главным образом из-за наличия сезонного снежного покрова), поэтому их характеристики получены с топографических карт или заимствованы из литературных источников. Несмотря на указанные недостатки, этот Каталог характеризует комплексное состояние оледенения Восточного Саяна на середину XX в.

Позже отдельные ледники Восточного Саяна (или их группы) исследовались разными методами и с различной детальностью [3–5]. На основе космических снимков проведена повторная инвентаризация 13 ледников в юго-восточной части Восточного Саяна [5]. В настоящее время назрела необходимость в получении и анализе новых данных о современном состоянии ледников с использованием стандартизованных методов [6]. К задачам настоящего исследования относятся: 1) выбор оптимальной методики картирования малых ледников с использованием многоканальных снимков среднего разрешения (Landsat); 2) создание электронного ГИС-каталога ледников Восточного Саяна по состоянию на 2000 г. и его статистический анализ; 3) оценка изменений площади оледенения с конца малого ледникового периода (МЛП, ~1850 г.); 4) оценка связи между климатическими и ледниковыми изменениями.

Материалы и методы исследований

Район исследований. Восточный Саян – это горный хребет, расположенный на юге Восточной Сибири и вытянутый с северо-запада на юго-восток приблизительно на 700 км. Абсолют-

ная высота вершин увеличивается в юго-восточном направлении с 1,6 до 3,5 км. Наивысшая отметка (гора Мунку-Сардык, 3491 м) расположена на границе между Россией и Монголией. Горные ледники сосредоточены главным образом в трёх ключевых районах (рис. 1), расположенных вокруг высокогорных массивов: Мунку-Сардык (верховья р. Иркут), пика Топографов (верховья рек Большой Енисей и Ока) и пика Грандиозный (верховья рек Казыр, Кан и Уда). Климатические условия района исследований определяются его континентальным положением и горным характером территории [5]. Средняя годовая температура воздуха, по данным метеостанции (ГМС) Орлик (1388 м над ур. моря; все высоты в статье даны над ур. моря), составляет –4,7 °С, средняя летняя +11,7 °С. Распределение осадков контролируется рельефом (наиболее увлажнены наветренные западные и северо-западные склоны), при этом максимум осадков приходится на летние месяцы (около 70% годовой суммы). На высотах более 2000 м осадки выпадают в твёрдом виде в течение десяти месяцев (сентябрь–июнь), хотя кратковременные снегопады в горах возможны и в летний период.

Космические снимки. Для картирования ледников мы использовали многозональные снимки среднего разрешения со спутников Landsat-5 (радиометр TM) и Landsat-7 (радиометр ETM+). Радиометры TM/ETM+ охватывают оптический и ближний инфракрасный (VNIR, пространственное разрешение 15–30 м), коротковолновый инфракрасный (SWIR, 30 м) и тепловой инфракрасный (TIR, 60–120 м) спектральные диапазоны. Снимки бесплатно получены с сервера GLSF (Global Land Cover Facility, [7]) в ортотрансформированном виде (уровень обработки L1G) в проекции UTM (зоны 46 и 47, эллипсоид WGS84). Всего на район исследования подобрано 16 практически безоблачных снимков Landsat, охватывающих 25-летний период с 1986 по 2011 г. (табл. 1). Девять снимков получены во второй половине сезона абляции (конец июля – начало сентября) и поэтому имеют высокое качество (сезонный снежный покров на них минимален); семь снимков относятся к началу периода абляции (июнь – начало июля), когда снежный покров ещё сохранялся на многих участках, и характеризуются низким или средним качеством. В соответствии

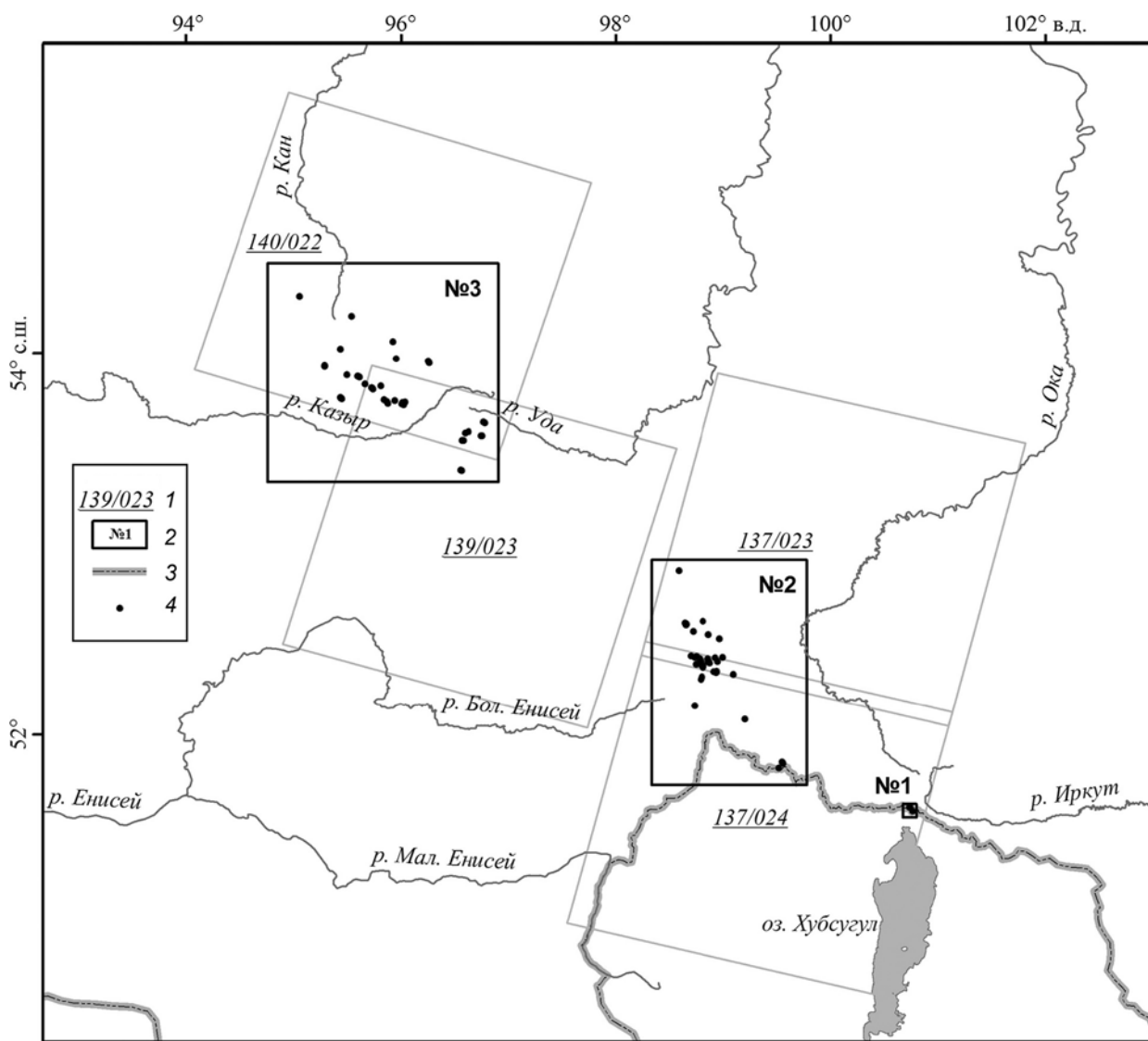


Рис. 1. Район исследований (Восточный Саян):

1 – сцены Ландсат (подчёркнуты колонка/ряд); 2 – ключевые районы (№ 1 – Мунку-Сардык, № 2 – пик Топографов, № 3 – пик Грандиозный); 3 – российско-монгольская граница; 4 – ледники КЛ1950

Fig. 1. Study area (East Sayan):

1 – utilized Landsat scenes (path/raw are underlined); 2 – key regions (№ 1 – Munku-Sardyk, № 2 – Peak Topografov, № 3 – Peak Grandioznyy); 3 – Russian-Mongolian boundary; 4 – glaciers of KL1950

с годом съёмки все снимки разделены на три группы (примерно с десятилетним временным интервалом): 1990, 2000 и 2010 гг.

Цифровая модель рельефа (ЦМР). Высотные измерения ледников выполнялись с помощью цифровой модели (размер матрицы 90 м) радарной топографической съёмки SRTM (Shuttle radar topographic mission), выполненной в феврале 2000 г. [8]. В настоящей работе использована версия 4.1 модели [9]. Предварительное тестирование ЦМР на отдельных участках района иссле-

дований показало вполне приемлемую точность (≤ 10 м) высотных измерений [5]. Кроме того, модель SRTM хорошо подходит для каталогизации ледников на рубеже XX и XXI вв.

Технология картирования ледников. В настоящей работе реализован метод полуавтоматического дешифрирования ледников с использованием многозональных изображений, широко практикующийся при каталогизации ледников в разных частях Земли с помощью спектрально-зональных космических изображений [6, 10, 11]. Дан-

Таблица 1. Космические снимки (сцены) Landsat-5/7, использованные в настоящей работе*

| Временное окно | Колонка | Ряд | Спутник | Сенсор | Год | Месяц | День | Качество |
|----------------|---------|-----|-----------|--------|------|-------|------|------------------------------|
| ~1990 | 137 | 24 | Landsat-5 | TM | 1986 | 7 | 23 | Высокое |
| | 140 | 22 | | | 1989 | 9 | 6 | |
| | 139 | 23 | Landsat-4 | | 1989 | 9 | 7 | |
| | 137 | 23 | Landsat-5 | | 1995 | 6 | 30 | Низкое (снег) |
| ~2000 | 140 | 22 | Landsat-7 | ETM+ | 2000 | 8 | 27 | Высокое |
| | 139 | 23 | | | 2001 | 6 | 20 | Среднее (снег) |
| | 137 | 23 | | | 2001 | 8 | 9 | Высокое |
| | 137 | 24 | | | 2001 | 8 | 9 | |
| ~2010 | 137 | 24 | Landsat-5 | TM | 2006 | 6 | 12 | Низкое (снег) |
| | 137 | 23 | Landsat-7 | ETM+ | 2007 | 8 | 10 | Среднее (поломка модуля SLC) |
| | 139 | 23 | Landsat-5 | TM | 2007 | 9 | 1 | Высокое |
| | 140 | 22 | | | 2007 | 9 | 8 | |
| | 139 | 23 | | | 2009 | 7 | 4 | Низкое (снег) |
| | 137 | 24 | | | 2009 | 7 | 6 | |
| | 137 | 23 | | | 2010 | 9 | 11 | Высокое |
| | 140 | 22 | | | 2011 | 7 | 1 | Низкое (снег) |

*TM – Thematic Mapper (тематический сканер); ETM+ – Enhanced Thematic Mapper (улучшенный тематический сканер плюс); SLC – Scan Line Corrector (корректор линий сканирования).

ный метод («band ratio method» в англоязычной литературе) основан на контрасте между высокой отражательной способностью снежно-ледовых поверхностей в видимой части спектра и сильным поглощением в коротковолновом инфракрасном (SWIR) диапазоне. Для идентификации ледников использовалась комбинация 3-го (красного) и 5-го (SWIR) каналов Landsat (TM3/TM5), которая считается наиболее оптимальной при картировании затенённых и замороженных участков ледников [11, 12]. Изображения обрабатывались в программе ENVI и предусматривали: 1) построение индексных изображений (TM3/TM5); 2) классификацию снежно-ледовых поверхностей (объединение пикселей с одинаковыми спектральными характеристиками в один класс) с помощью пороговых значений; 3) заключительную обработку классифицированных изображений, включающую в себя сглаживание медианным (3×3 пиксела) фильтром для удаления ошибочных изолированных пикселей и конвертацию в полигоны (шейп-файлы). Оптимальные пороговые значения (1,8–2,2) определены для каждого снимка экспериментальным путём с использованием эталонных выборок из 5–10 ледников.

Полученные полигоны далее редактировались в программе ArcGIS 10.2. Прежде всего, мы уда-

лили все полигоны площадью менее $0,02 \text{ км}^2$, так как эти объекты с большой вероятностью представляют собой небольшие снежники. Автоматическая классификация неизбежно генерирует ошибки на проблемных участках (затенение, сезонный снежный покров, поверхностная морена и озёра, примыкающие к ледникам, см. далее), поэтому на заключительном этапе картирования выполнялась ручная коррекция ледниковых контуров. Участки с ошибочной классификацией визуально устанавливались и корректировались по цветосинтезированному RGB-изображению (комбинация каналов 5-4-3), на котором чётко выделяется граница между ледниками (снежниками) и окружающими их горными склонами. Для снимков Landsat (ETM+) пространственное разрешение RGB-изображения было улучшено до 15 м с помощью панхроматического канала (pan-sharpening). Дополнительно для коррекции контуров ледников использованы высокоразрешающие снимки WorldView-1 и Quick Bird (пространственное разрешение 0,5 м), снимки Google Earth, а также полевые данные (GPS-съёмки границ ледников и их конечных морен в районе массивов Мунку-Сардык и пик Топографов). В ходе детального анализа снимков разного разрешения ледники отделяли от снежников по ряду морфологических признаков (наличие трещин и от-

крытого льда, изменение высоты поверхности, вмещающие формы рельефа и др.). Морфометрические измерения и заполнение атрибутивной базы данных (каталога) ледников проводились в ArcGIS 10.2 с использованием ЦМР SRTM (применялся инструмент «зональная статистика»).

Оценка точности картирования. Ошибки картирования ледников по снимкам Landsat рассчитаны для 11 ледников размером от 0,04 до 1,4 км², расположенных на тестовом участке в районе пика Топографов. Мы сравнили контуры ледников со снимка Landsat (сентябрь 2010 г.) с контурами на эталонном высокоразрешающем снимке. В качестве эталонного использован снимок WorldView-1, сделанный в июле 2008 г. (пространственное разрешение 0,5 м). Несмотря на разницу в два года, оба изображения абсолютно идентичны по условиям снежности (наиболее критичного параметра при дешифрировании космических снимков). Количественная оценка ошибок выполнена для ручного, автоматического и полуавтоматического методов дешифрирования. Ручная векторизация каждого из 11 ледников выполнялась не менее десяти раз двумя независимыми операторами (для снимка Landsat по цветосинтезированному RGB-изображению, каналы 5-4-3, пространственное разрешение 30 м). Итоговая относительная ошибка картирования рассчитывалась как среднее из серии измерений.

Реконструкция ледников малого ледникового периода. Цветосинтезированное RGB-изображение (комбинация каналов 5-4-3) позволяет в большинстве случаев достаточно надёжно идентифицировать прилегающие к ледникам (или расположенные в непосредственной близости от них) незадернованные скопления каменного материала, которые мы интерпретировали как конечные морены МЛП. Нижние границы ледников МЛП проведены по внешнему (от ледника) краю моренных отложений. Дополнительно для реконструкции использованы снимки высокого разрешения (WorldView-1, Quick Bird), Google Earth и полевые данные. В настоящей работе реконструкция выполнена для большей части (63 из 83) ледников из КЛ1950.

Анализ климатических изменений. Для анализа изменений климата использованы средние месячные данные ВНИИГМИ-МЦД [13] по приземной температуре воздуха и атмо-

сферным осадкам на ГМС Иркутск (52°16' с.ш., 104°19' в.д., 469 м) и Орлик (52°31' с.ш., 99°49' в.д., 1388 м). К сожалению, сеть ГМС в районе исследований довольно редкая, а ряды метеоданных имеют разную продолжительность. В связи с этим для анализа пространственно осреднённых климатических изменений в регионе за более длительный период времени (1950–2010 гг.) мы использовали данные сеточного архива метеоданных К. Виллмота и К. Мацуро (W&M) из Университета Делавера (США) [14, 15]. Архив W&M был создан на основе данных наземных ГМС (месячные значения температуры и осадков), интерполированных в узлы регулярной сетки с разрешением 0,5 × 0,5°. При этом температура с помощью вертикального градиента (6,0 °С/км) приводилась сначала к уровню моря, а затем к высоте ЦМР. Сравнительный анализ данных архива W&M и двух ГМС района исследований (Иркутск и Орлик) показал наличие статистически значимой корреляции между ними: по температуре (июнь–август) коэффициент корреляции составил 0,91–0,99, а по осадкам (сентябрь–июнь) – 0,44–0,88. При этом отклонения равны 0,0–0,06 °С по температуре и 5–6% по осадкам. Таким образом, данные архива W&M вполне репрезентативны для анализа региональных климатических изменений. В настоящей работе использованы данные за период 1950–2010 гг., осреднённые для района, ограниченного 95,0–100,5° в.д. и 51,5–54,5° с.ш.

Результаты исследований

Точность картирования малых ледников по снимкам Landsat. Использование космических снимков среднего разрешения (Landsat) для картирования малых ледников неизбежно приводит к ошибкам. Поэтому сначала мы оценили ошибки, связанные с методом картирования (ручная оцифровка, автоматическое дешифрирование) путём сравнения площадей ледниковых контуров, полученных по снимкам среднего и высокого разрешения. Точность оцифровки отдельных ледников ручным способом на RGB-изображении составляет от –4 до +15% (средняя +6%), т.е. ручная оцифровка завышает истинную площадь ледников в среднем на 6%. Погрешность ручной век-

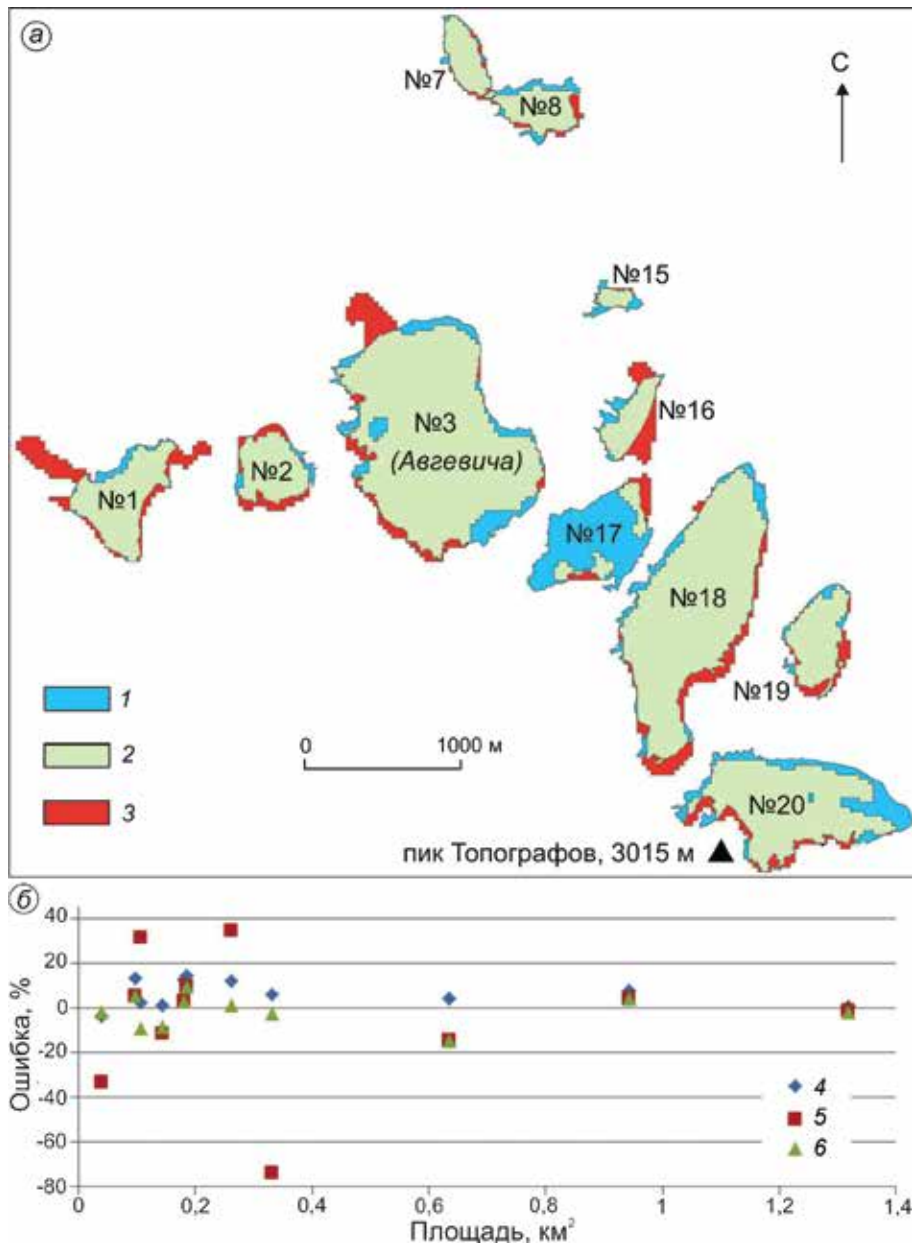


Рис. 2. Ошибки картирования ледников по снимкам Landsat на тестовом участке (пик Топографов): *a* – карта, показывающая недооценённые (1), корректные (2) и переоценённые (3) площади ледников, дешифрированных автоматическим способом; цифры на карте – номера ледников; *б* – ошибки картирования ледников разных размеров при использовании ручного (4), автоматического (5) и полуавтоматического (6) методов

Fig. 2. Errors of glacier outlines derived from Landsat imagery on a test gerion (Peak Topografov): *a* – map showing underestimated (1), correct (2) and overestimated (3) glacier areas mapped by automated technique; figures indicate the glacier numbers; *б* – mapping errors for glaciers of different sizes with using manual (4), automated (5) and semi-automated (6) techniques

торизации («ошибка оператора»), рассчитанная как стандартное отклонение площади ледника при его независимой десятикратной векторизации, не превышает $\pm 6\%$. В то же время индивидуальные ошибки автоматической классификации варьируют значительно: от -74 до $+35\%$.

Основные источники ошибочной классификации – приледниковые озёра, снежники, моренный покров и плотная облачность (рис. 2, *a*). Затенение ледников (или их частей) также существенно влияет на точность картирования, однако на данном тестовом участке оно имеет

второстепенное значение. Несмотря на большой разброс значений, средняя ошибка составляет всего -4% , что свидетельствует об уменьшении (взаимной компенсации индивидуальных погрешностей) ошибки измерения суммарной площади ледников при увеличении размера выборки. В целом, при автоматической классификации около 17% общей площади ледников недооценивается, а 13% – переоценивается.

Самую высокую точность даёт метод автоматической классификации с последующей ручной коррекцией на проблемных участках (полуавтоматический метод). При этом разброс индивидуальных отклонений площади уменьшается до 15% , при минимальном среднем значении $-1,4\%$ (см. рис. 2, б). Наши тесты показали, что наибольшее влияние на точность векторизации ледников оказывает не столько их размер, сколько закрытость его границ снежниками, моренным покровом и т.д. Ошибка полуавтоматического дешифрирования, осреднённая для разных размерных классов, лежит в пределах $\pm 6\%$. По сравнению с ручной векторизацией площадь ледников более $0,1 \text{ км}^2$ систематически занижается на несколько процентов. Известно, что систематическая ошибка зависит от размера ледника (увеличивается с уменьшением размера) и точности геопривязки [10]. Для тестового участка мы не обнаружили какой-либо зависимости ошибки от размера ледника, что, вероятно, объясняется небольшим числом малых ледников (площадью менее $0,1 \text{ км}^2$) в исследуемой выборке. Чтобы оценить величину ошибки, обусловленную размерностью, для нескольких ледников (площадью менее $0,1 \text{ км}^2$) вдоль их периметра была построена буферная зона шириной, равной $1/2$ пространственного разрешения снимка. Рассчитанная величина ошибки (т.е. площадь буферной зоны) для исследованных ледников не превышала $\pm 15\%$. В итоге, с учётом полученных количественных оценок, в данной работе приняты следующие градации ошибок полуавтоматического картирования: для ледников площадью менее $0,1 \text{ км}^2$ – $\pm 15\%$; $0,1–1,0 \text{ км}^2$ – $\pm 10\%$; более $1,0 \text{ км}^2$ – $\pm 5\%$. Для реконструированных ледников была принята погрешность 10% .

Каталог ледников 2000 г. Референтный Каталог ледников 2000 г. (КЛ2000) содержит 172 ледника общей площадью $16,6 \pm 1,9 \text{ км}^2$ и объёмом около $0,6 \text{ км}^3$. Ледники распространены между

$95,3–100,6^\circ$ в.д. и $51,7–54,4^\circ$ с.ш. Площади отдельных ледников варьируют от $0,02$ до $1,37 \text{ км}^2$. Преобладают небольшие ледники: 76% ледников имеют площадь менее $0,1 \text{ км}^2$. На их долю приходится 35% общей площади (рис. 3, а). Имеется только один ледник (Авгевича) площадью более $1,0 \text{ км}^2$ (8% общей площади). Наибольшая доля общей площади (41%) приходится на ледники размером $0,1–0,5 \text{ км}^2$. 36% ледников (см. рис. 3, б) имеют северо-восточную экспозицию, при этом максимальная суммарная площадь (43% , см. рис. 3, в) у ледников северной экспозиции. Высоты ледников немного увеличиваются от северо-восточных к юго-восточным экспозициям (см. рис. 3, г), что может быть связано с радиационными условиями. Большой разброс высоты ледников для всех секторов обусловлен влиянием локальных особенностей рельефа. Средний уклон увеличивается с уменьшением размера ледника (см. рис. 3, д), однако сильный разброс уклонов небольших ледников указывает на значительное влияние локальных условий. Распределение площади по высоте близко к нормальному, при этом 45% ледников сосредоточено в высотном интервале $2400–2700 \text{ м}$ (см. рис. 3, е). Средняя высота ледников $2260 \pm 340 \text{ м}$. Высота ледников и их границ питания увеличивается с северо-запада на юго-восток в соответствии с увеличением степени континентальности и общим повышением высоты хребта в юго-восточном направлении (см. рис. 3, ж–з).

Сравнение КЛ2000 и КЛ1950. Из 83 ледников площадью более $0,1 \text{ км}^2$, приведённых в Каталоге ледников СССР [2] по состоянию на 2000 г., нами идентифицировано 74 ледника. Девять ледников общей площадью $2,0 \text{ км}^2$ исчезли. Дополнительно мы включили в КЛ2000 98 «новых» ледников общей площадью $4,8 \pm 0,7 \text{ км}^2$. Разница в числе ледников, включённых в КЛ1950 и КЛ2000, вероятно, объясняется небольшими размерами «новых» ледников (90 ледников имеют площадь менее $0,1 \text{ км}^2$). Как уже отмечалось, при составлении КЛ1950 (дешифрирование аэрофотоснимков) часть настоящих ледников могла быть принята за снежники, особенно принимая во внимание повышенное количество зимних осадков в начале 1950-х годов (см. далее). Несмотря на общее увеличение числа ледников в КЛ2000, их суммарная площадь уменьшилась на $13,7 \text{ км}^2$ (табл. 2). Сокращение

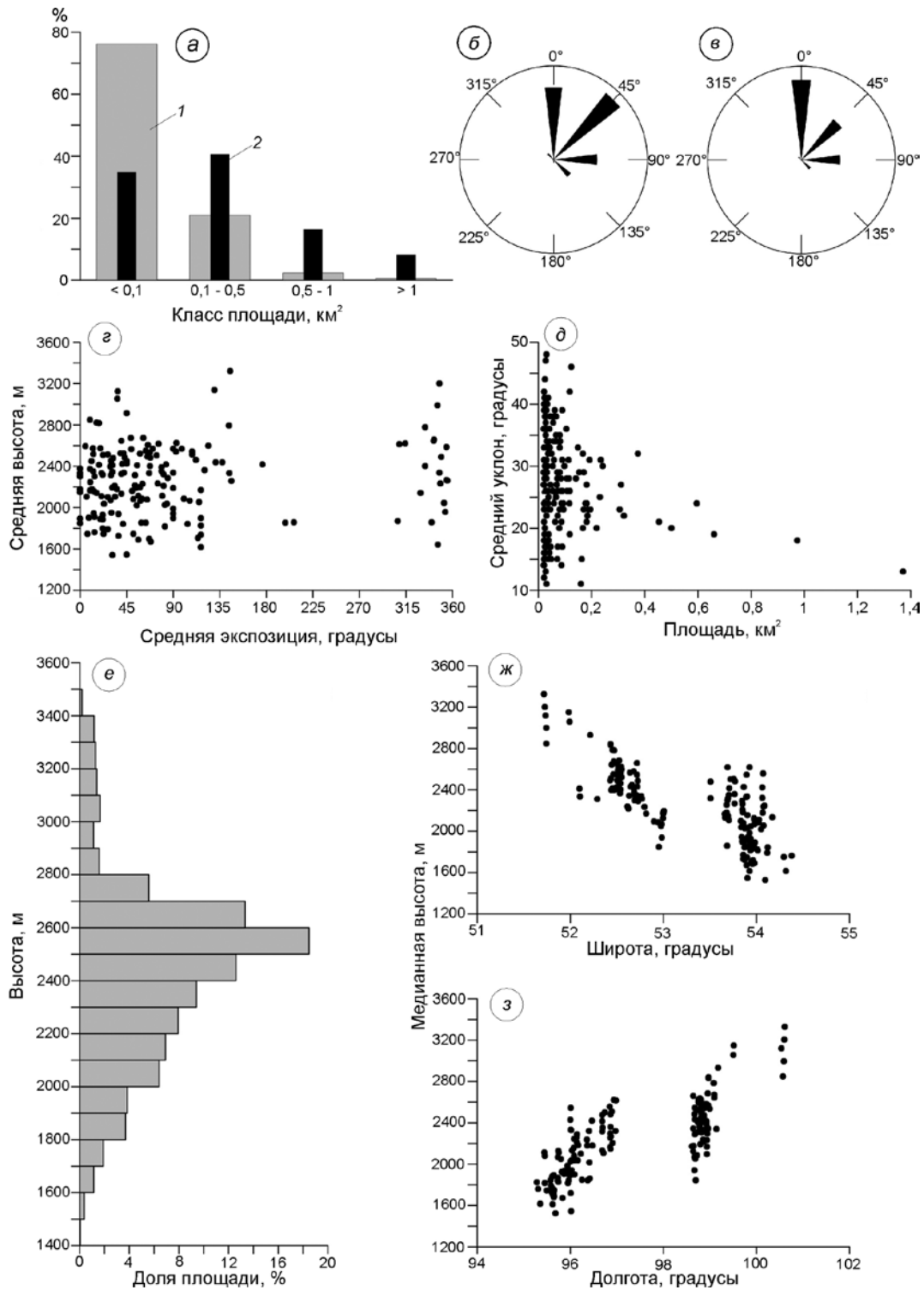


Рис. 3. Статистические характеристики КЛ2000:

распределение числа (1) и площади (2) ледников по классам размерности (а); распределение числа (б) и площади (в) ледников по экспозиции; распределение средней высоты по экспозиции (г); распределение среднего уклона по площади (д), распределение площади по высоте (е), распределение медианной высоты ледников по широте (ж) и долготе (з)

Fig. 3. Statistical characteristics of KL2000:

number (1) and area (2) of glaciers as functions of size class (a); number (б) and area (в) of glaciers as functions of aspect; mean glacier altitudes as a function of aspect (г); mean glacier slope as a function of area (д); area–elevation distribution of ice masses in 100 m elevation bins (е), median ice elevations and functions of latitude (ж) and longitude (з)

Таблица 2. Сравнительная характеристика ледников (по числу, площади и экспозиции) по данным КЛ1950 [2] и КЛ2000

| Площадь ледников и экспозиция | Число ледников | | Площадь ледников, км ² | | Изменения | |
|-------------------------------|----------------|------------|-----------------------------------|-----------------|----------------|-----------------------------------|
| | 1950 г. | 2000 г. | 1950 г. | 2000 г. | числа ледников | площади ледников, км ² |
| Площадь, км ² : | | | | | | |
| менее 0,1 | 22 | 131 | 1,2 | 5,8±0,9 | 109 | +4,6 |
| 0,1–0,5 | 61 | 36 | 12,7 | 6,7±0,7 | –25 | –6,0 |
| 0,5–1,0 | 18 | 4 | 11,3 | 2,7±0,3 | –14 | –8,6 |
| более 1,0 | 4 | 1 | 5,1 | 1,4±0,1 | –3 | –3,7 |
| <i>Итого</i> | <i>105</i> | <i>172</i> | <i>30,3</i> | <i>16,6±1,9</i> | <i>67</i> | <i>–13,7</i> |
| Экспозиция*: | | | | | | |
| С | 22 | 53 | 8,9 | 7,1±0,72 | 31 | –1,8 |
| СВ | 43 | 62 | 12,5 | 4,6±0,58 | 19 | –7,9 |
| В | 14 | 32 | 5,5 | 3,4±0,39 | 18 | –2,1 |
| ЮВ | 3 | 16 | 1,9 | 1,1±0,14 | 13 | –0,8 |
| Ю | 0 | 2 | 0,0 | 0,1±0,01 | 2 | 0,1 |
| ЮЗ | 0 | 1 | 0,0 | 0,0 | 1 | 0,0 |
| З | 0 | 0 | 0,0 | 0,0 | 0 | 0,0 |
| СЗ | 1 | 6 | 0,3 | 0,3±0,04 | 5 | 0,0 |
| <i>Итого</i> | <i>83</i> | <i>172</i> | <i>29,1</i> | <i>16,6±1,9</i> | <i>89</i> | <i>–12,5</i> |

*Ледники КЛ1950 площадью более 0,1 км².

числа и площади наблюдается во всех размерных группах, за исключением ледников площадью менее 0,1 км², число и площадь которых увеличились не только за счёт добавления «новых» ледников, но и в результате сокращения ледников более значительной (0,1–0,5 км²) площади (47 ледников общей площадью 2,3±0,3 км²).

Изменение площади ледников. Используя выборки ледников разной протяжённости (за основу взяты 83 ледника из КЛ1950), базирующиеся на данных пяти каталогизаций (на 1850, 1950, 1990, 2000 и 2010 гг.), мы сравнили изменения суммарной площади (в каждой выборке) за период с 1850 по 2010 г. в шести временных интервалах (табл. 3). С 1850 по 2000 г. прослеживается отчётливая тенденция последовательной деградации оледенения (на 59±22%), однако её скорость менялась во времени. Площадь отдельных ледников сократилась с 30 до 100% (рис. 4, 5). Характерно, что значения относительного сокращения и их разброс увеличиваются с уменьшением площади ледника, что связано со значительным усилением влияния локальных условий (топография, затенённость, микроклимат и т.д.) на динамику небольших ледников. Так, если ледники площадью менее 0,1 км² сократились в среднем на 76±24%, то ледники площадью более 1,0 км² – на 45±11%. Наибольшее сокращение

Таблица 3. Относительное изменение суммарной площади ледников в периоды с 1850 по 2010 г.

| Период | Число ледников в выборке | Изменение площади, % | Скорость изменения, %/год |
|------------|--------------------------|----------------------|---------------------------|
| 1850–1950* | 50 | –25 | –0,25 |
| 1850–1990 | 55 | –42 | –0,30 |
| 1850–2000 | 63 | –59±22 | –0,40 |
| 1850–2010 | 63 | –58 | –0,36 |
| 1950*–1990 | 55 | –24 | –0,61 |
| 1950*–2000 | 68 | –46 | –0,93 |
| 1990–2000 | 67 | –32 | –3,19 |
| 1990–2010 | 67 | –28 | –1,42 |
| 2000–2010 | 75 | +4 | +0,38 |

*Использованы данные по открытой площади ледников из КЛ1950 [2].

(46%) пришлось на вторую половину XX в. При этом скорость деградации в 1950–2000 гг. была в 3,7 раза больше чем в 1850–1950 гг.

В последнее десятилетие XX в. наблюдалась ускоренная деградация площади ледников: около 3%/год, что в 11 раз выше скорости сокращения за период 1850–1990 гг. В 1990–2000 гг. сокращение площади наблюдалось у 9/10 исследованных ледников (максимальное сокращение на ледниках площадью 0,1–0,5 км²), при этом увеличение площади (1/10) отмечалось только у ледников площадью менее 0,1 км². В 2000–2010 гг. площадь

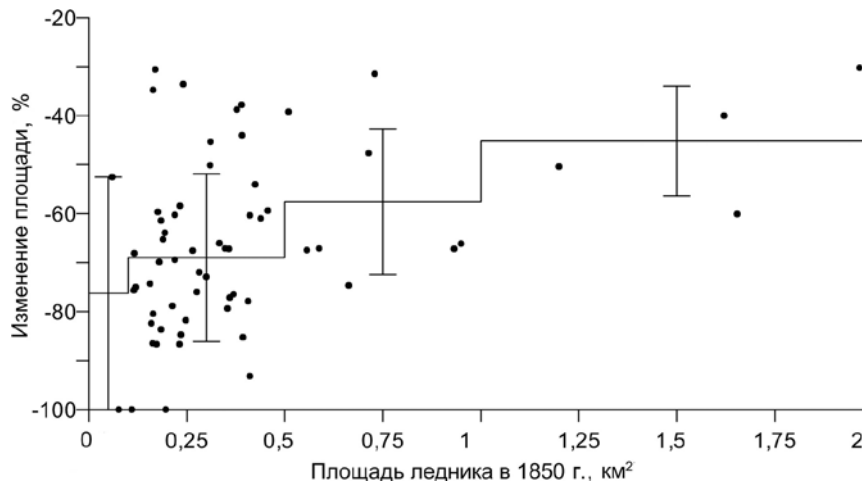


Рис. 4. Относительные изменения площади ледников в 1850–2000 гг. в зависимости от их размеров: Горизонтальные линии – средние значения по четырём классам размерности (меньше 0,1; 0,1–0,5; 0,5–1,0 и больше 1,0 км²); вертикальные линии – стандартные отклонения для каждой группы

Fig. 4. Relative glacier area changes from 1850 to 2000 versus glacier size: Horizontal lines indicate mean values of glacier area change for four size classes (< 0.1; 0.1–0.5; 0.5–1.0, and > 1.0 km²); vertical lines show standard deviation for each area class

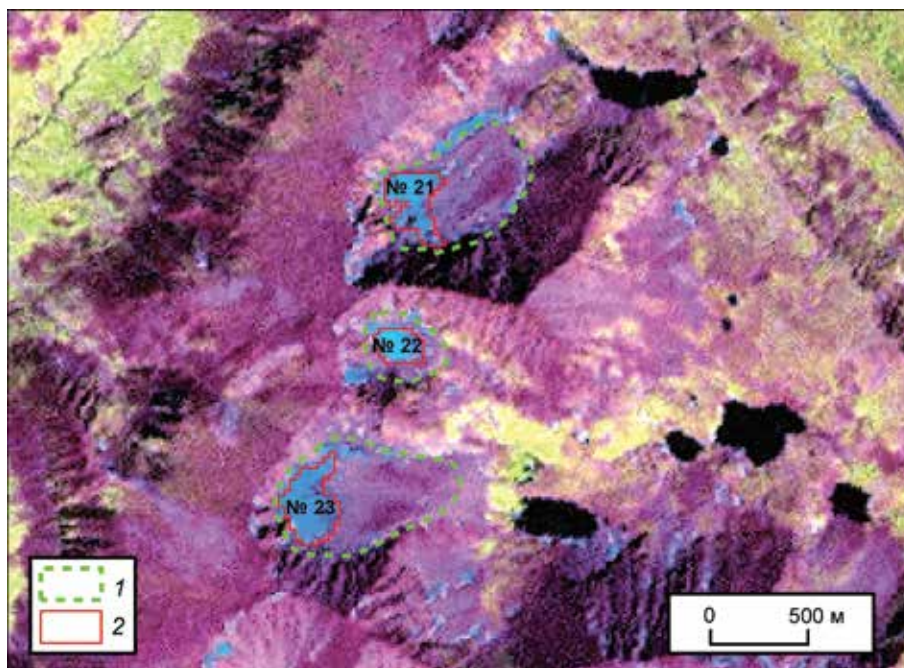


Рис. 5. Пространственные изменения границ ледников (№ 21–23) в верховьях правых притоков р. Хэлгин (бассейн р. Ока) между 1850 г. (1) и 2000 г. (2).

Подложка – снимок Landsat от 9.08.2001 г. (комбинация каналов 5, 4 и 3)

Fig. 5. Spatial changes of glaciers (№ 21–23) in the upper right-hand tributaries of Khelgin River (Oka watershed) between 1850 (1) and 2000 (2).

Landsat scene from 9.08.2001 is used as background (combination of bands 5, 4 and 3)

оледенения, наоборот, увеличилась на 4% преимущественно за счёт малых ледников. Так, на долю ледников менее 0,5 км² приходится 93% общего увеличения площади в этот период и 71% её уменьшения, что показывает высокую чувствительность небольших ледников. Однако отме-

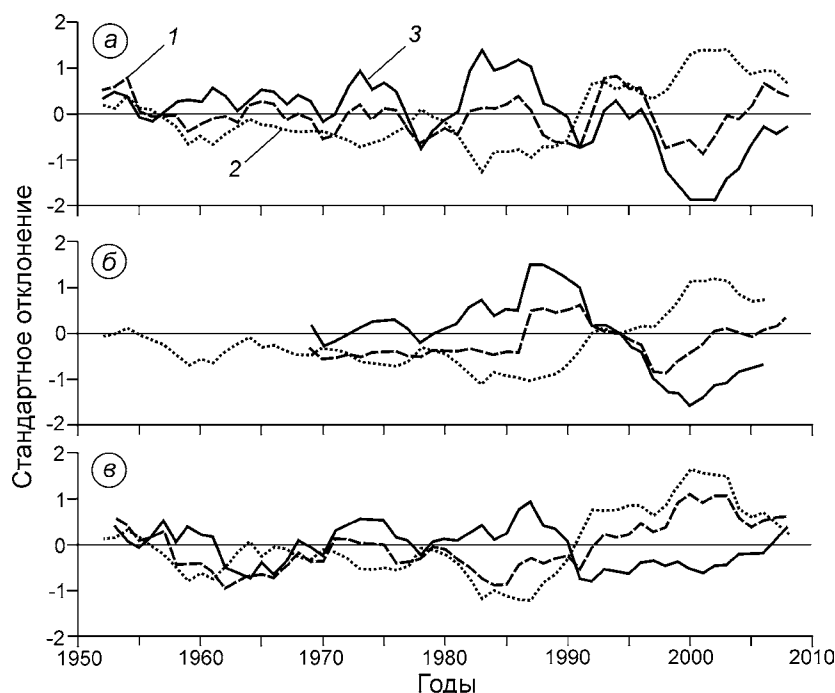


Рис. 6. Сглаженные по пятилетиям отклонения (нормированные за период 1950–2010 гг.) сумм осадков периода аккумуляции (сентябрь–июнь) (1), средней летней (июнь–август) температуры (2) и индекса баланса массы (3) по данным ГМС Иркутск (а), Орлик (б) и глобального сеточного архива W&M (в)

Fig. 6. Smoothed (5-year running) anomalies (normalized to the period of 1950–2010) of accumulation season precipitation (September–June) (1), mean summer (June–August) temperature (2) and mass balance index (3) based on weather station records of Irkutsk (a), Orlik (b) and gridded W&M climatology (c)

ченный рост площади статистически незначим, поскольку он не превышает принятую величину максимальной ошибки ($\pm 15\%$).

Климатические изменения в 1950–2010 гг. Поскольку сокращение размеров ледников связано с изменениями баланса массы, для оценки связи между региональным климатом и ледниковой динамикой проанализированы многолетние изменения осадков периода аккумуляции (сентябрь–июнь, когда осадки выпадают преимущественно в твёрдом виде) и средней летней (июнь–август) температуры как показателей аккумуляции и абляции за период 1950–2010 гг. (рис. 6). Для этого использованы данные ГМС Иркутск и Орлик, а также сеточного климатического архива W&M. За исследуемый период изменения осадков не имеют выраженного тренда и характеризуются квазипериодическими колебаниями. Несмотря на имеющиеся различия между анализируемыми временными рядами (коэффициенты корреляции 0,20–0,34), обусловленные пространственной неоднородностью в распределении осадков, можно отметить и ряд схожих

черт. Так, положительные аномалии осадков наиболее часто наблюдались в первой половине 1950-х, 1990-х и во второй половине 2000-х годов, а отрицательные – в 1960–80-х и второй половине 1990-х годов (ГМС Иркутск и Орлик).

В отличие от осадков летняя температура имеет менее выраженные пространственные различия (коэффициенты корреляции 0,89–0,94). В 1950–80-х годах температура снижалась, причём летние сезоны первой половины 1980-х годов были самыми прохладными. На фоне общего снижения кратковременные повышения летней температуры наблюдались в 1960-х и конце 1970-х годов. С середины 1980-х годов летняя температура в регионе интенсивно росла, а пик потепления пришёлся на 2002 г., после этого температурный тренд вновь сменил знак на отрицательный. Разность между нормированными значениями зимних осадков и летней температуры можно рассматривать в качестве упрощённого индекса (см. рис. 6), который характеризует влияние регионально-осреднённого климата на баланс массы ледников без учёта локальных фак-

торов [16]. Индексы, рассчитанные по данным ГМС и архива W&M, хорошо коррелируют между собой (коэффициент корреляции 0,46–0,60).

Наиболее благоприятные климатические условия для увеличения баланса массы ледников наблюдались в 1950-х и особенно в 1980-х годах. В то же время, примерно с середины 1990-х до середины 2000-х годов климатические условия в регионе, наоборот, способствовали уменьшению баланса массы ледников. Таким образом, изменения площади ледников в последние десятилетия хорошо согласуются с изменениями регионального климата. Так, ускоренная дегляциация в 1990–2000 гг. соответствует отрицательной аномалии твёрдых осадков на фоне интенсивного роста летней температуры, а стабилизация ледниковой динамики в 2000–2010 гг. согласуется с положительной аномалией осадков на фоне снижения летней температуры.

Обсуждение результатов

Применение различных технологий картирования ледников (автоматическое, полуавтоматическое, ручное) на тестовом участке с использованием многоканального изображения Landsat и высокоразрешающего снимка WorldView-1 показало, что ошибка полуавтоматического картирования даже для небольших ледников не превышает 15%. По данным [17], ошибка картирования ледников на снимках среднего разрешения (около 30 м/пиксель) увеличивается с уменьшением их размера и для малых ледников (площадью менее 0,5 км²) может превышать 25%. Это связано главным образом с ошибочной классификацией небольших снежников. Действительно, на снимках Landsat (в отличие от снимков субметрового разрешения) практически не видны многие характерные особенности морфологии ледников (трещины, участки открытого льда под снегом или моренным покровом, резкие изменения высоты поверхности). Однако фильтрация автоматически классифицированных полигонов по размеру (в нашем случае полигоны площадью менее 0,02 км² удалялись), наряду с ручной коррекцией на проблемных участках, значительно повышает точность картирования. Часто большая проблема дешифрирования небольших ледников обусловлена закрытостью их

поверхностной мореной [18]. Однако площадь моренного покрова большинства ледников Восточного Саяна незначительна, что существенно снижает вероятность данного источника ошибки. Для этих ледников основная проблема — либо наличие сезонного снежного покрова, либо затенение ледника (или его частей).

В настоящей работе из-за отсутствия высоко-разрешающих снимков мы не оценивали ошибку картирования полностью или частично затенённых ледников, которые довольно многочисленны на снимке Landsat 140/022 (см. рис. 1). Влияние сезонного снежного покрова на точность дешифрирования малых ледников определяет важность подготовительного этапа работы, связанного с выбором наиболее оптимальных (по времени съёмки) снимков. Ошибки измерения площади ледников, связанные с разными параметрами качества исходного снимка, могут взаимно компенсироваться, как это было установлено на тестовом участке. При этом суммарная ошибка минимизируется при увеличении размера выборки. В целом, автоматическое картирование ледников с использованием многоканальных космических изображений (например, Landsat, Aster) с последующей ручной коррекцией на проблемных участках можно считать оптимальным при выполнении массовой каталогизации ледников на достаточно большой площади. Основные его преимущества таковы: дешевизна (почти все снимки Landsat находятся в свободном доступе), минимальные трудозатраты и, наконец, сведение фактора «субъективного дешифрирования» к минимуму.

Ледники Восточного Саяна с конца МЛП (~1850 г.) проявляют отчётливую тенденцию к сокращению, при этом масштабы дегляциации (1850–2000 гг., 59±22%, или около 0,40%/год) близки к максимальным оценкам, полученным в других районах Евразии, например на Алтае и в Альпах. Так, по данным [19], ледники массивов Талдуайр и Монгун-Тайга-малая в юго-восточном Алтае с конца МЛП по 2001 г. потеряли соответственно 61% (0,34%/год) и 74% (0,41%/год). В то же время масштабы сокращения ледников Восточного Саяна в разы больше чем, например, в массиве Буордах (хр. Черского) (МЛП–2001 гг., –17%, т.е. –0,11 %/год) [20]. По нашему мнению, эти различия можно объяснить более южным (на 12°) положением восточно-саянских ледников, способствующим их повышенной абляции.

Ускоренная дегляциация ледников Восточного Саяна в последнем десятилетии XX в. отчётливо проявилась и в других районах. Так, после 1995 г. скорость относительного сокращения площади ледников Кодара резко выросла по сравнению с предшествующим периодом 1974–1995 гг. [21]. По данным [22], в Альпах в 1973–1998 гг. ледники сокращались в три раза быстрее, чем в 1850–1973 гг., а в 1985–1998 гг. – в семь раз быстрее.

Изменения площади оледенения Восточного Саяна, по крайней мере в 1950–2010 гг., хорошо согласуются с климатическими колебаниями. При этом динамика ледников даже на относительно коротких (десятилетних) временных интервалах определяется соотношением таких параметров, как зимние осадки и летняя температура. Наибольшей чувствительностью к изменениям климата отличаются небольшие ледники (до 0,5 км²), составляющие основную долю в оледенении Восточного Саяна. Однако эволюция малых форм оледенения обусловлена не только региональным климатом, но и локальными факторами, связанными с морфологией ледниковых бассейнов, как это было показано на примере ледников Кодара [16, 21]. Анализ современных ледниковых изменений в горных районах России показал, что климатические изменения определяют общую тенденцию сокращения оледенения, а её пространственные особенности зависят от орграфических факторов [23]. Дальнейшие исследования будут направлены на детальное изучение связей между морфологическими особенностями ледников Восточного Саяна и их динамикой. Результаты нашего исследования подтверждают вывод, что континентальные ледники юга Восточной Сибири очень чувствительны к изменениям климата с конца МЛП [18, 24].

Выводы

В результате выполненных исследований обновлена информация о состоянии ледников Восточного Саяна на рубеже XX и XXI вв. На основе многоканальных космических изображений Landsat (TM/ETM+) с применением ГИС-технологий впервые составлен электронный Каталог ледников по состоянию на 2000 г. (КЛ2000), содержащий 172 ледника общей площадью 16,6±1,9 км². По сравнению с более

ранними данными Каталога ледников СССР (КЛ1950) в КЛ2000 вошли 98 «новых» ледников площадью 4,8 км², при этом девять ледников площадью 2,0 км² деградировали. Ледники дешифрованы полуавтоматическим методом, который предусматривал: автоматическую классификацию изображения; преобразование и конвертацию классифицированных пикселей в полигоны; фильтрацию полигонов площадью менее 0,02 км² и ручную коррекцию ледниковых контуров на проблемных участках. Анализ результатов дешифрования ледников на снимках среднего (Landsat) и высокого (World View-1) разрешения (на тестовом участке) показал, что ошибка дешифрования малых ледников не превышает 15%, при этом наибольший вклад в неё вносят сезонный снежный покров и затенённость.

На основе выборок различной длины получены количественные оценки изменения площади оледенения Восточного Саяна за период 1850–2010 гг. С середины XIX в. к 2000 г. площадь сократилась на 59±22% (0,40%/год). В 1990–2000 гг. ледники сокращались наиболее интенсивно: на порядок быстрее, чем за период 1850–1990 гг. В 2000–2010 гг. площадь оледенения незначительно (на 4%) увеличилась за счёт ледников площадью менее 0,5 км². В целом, изменения ледниковой площади в 1950–2010 гг. согласуются с изменениями регионального климата (зимние осадки и летняя температура). Ускоренная дегляциация 1990–2000 гг. наблюдалась при отрицательной аномалии зимних осадков на фоне роста летней температуры. Некоторая стабилизация ледников в 2000–2010 гг. связана с положительной аномалией зимних осадков на фоне снижения летней температуры. Помимо общеклиматических, существенно влияют на динамику малых ледников локальные факторы, связанные с особенностями вмещающего рельефа и микроклимата отдельных ледников.

Благодарности. Исследования выполнены при поддержке РФФИ (грант 15-05-04525). Авторы благодарят двух анонимных рецензентов за ценные замечания к статье.

Acknowledgements. The work was supported by the Russian Foundation for Basic Research (grant 15-05-04525). Authors thank two anonymous reviewers for their valuable comments to the article.

Литература

1. Перетолчин С.П. Ледники хребта Мунку-Сардык // Изв. Томского технологич. ин-та. 1908. Т. 9. Вып. 1. 47 с.
2. Каталог ледников СССР. Т. 16. Вып. 1. Ч. 3–5. Вып. 2. Ч. 1. Л.: Гидрометеоздат, 1973. 37 с.
3. Максимов Е.В. О ледниках массива Мунку-Сардык в Восточном Саяне // Изв. ВГО. 1965. Т. 97. Вып. 2. С. 176–180.
4. Китов А.Д., Коваленко С.Н., Плюснин В.М. Итоги 100-летних наблюдений за динамикой гляциальных геосистем массива Мунку-Сардык // География и прир. ресурсы. 2009. № 3. С. 101–108.
5. Осипов Э.Ю., Ашметьев А.Ю., Осипова О.П., Клевцов Е.В. Новая инвентаризация ледников в юго-восточной части Восточного Саяна // Лёд и Снег. 2013. № 3 (123). С. 45–54.
6. Paul F., Barry R., Cogley J., Frey H., Haeblerli W., Ohmura A., Ommanney C.S.L., Raup B., Rivera A., Zemp M. Recommendations for the compilation of glacier inventory data from digital sources // Annals of Glaciology. 2009. V. 50 (53). P. 119–126.
7. Электронный ресурс: Global Land Cover Facility. <http://www.landcover.org>
8. Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D. The Shuttle Radar Topography Mission // Review Geophysics. 2007. V. 45. P. 1–33. doi: 10.1029/2005RG000183.
9. Электронный ресурс: SRTM 90 m Digital Elevation Data. <http://srtm.csi.cgiar.org>
10. Bolch T., Menounos B., Wheate R. Landsat-based inventory of glaciers in western Canada, 1985–2005 // Remote Sensing of the Environment. 2010. V. 114 (1). P. 127–137. doi: 10.1016/j.rse.2009.08.015.
11. Paul F., Kääb A. Perspectives on the production of a glacier inventory from multispectral satellite data in Arctic Canada: Cumberland Peninsula, Baffin Island // Annals of Glaciology. 2005. V. 42. P. 59–66.
12. Andreassen L.M., Paul F., Kääb A., Hausberg J.E. Landsat-derived glacier inventory for Jotunheimen, Norway, and deduced glacier changes since the 1930s // The Cryosphere. 2008. V. 2. P. 131–145. doi: 10.5194/tc-2-131-2008.
13. Электронный ресурс: ВНИИГМИ-МЦД. <http://www.meteo.ru>
14. Электронный ресурс: Terrestrial Air Temperature: 1900–2010 Gridded Monthly Time Series (Version 3.01) http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/Global2011/README.GlobalTsT2011.html
15. Электронный ресурс: Terrestrial Precipitation: 1900–2010 Gridded Monthly Time Series (Ver-

References

1. Peretolchin S.P. Glaciers of the Munch-Sardyk Ridge. *Izvestiya Tomskogo tekhnologicheskogo instituta*. Proc. of the Tomsk Technological Institute. 1908, 9 (1): 47 p. [In Russian].
2. *Katalog lednikov SSSR*. USSR Glacier Inventory. V. 16. Is. 1. Pt. 3–5. Is. 2. Pt. 1. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1973: 37 p. [In Russian].
3. Maksimov E.V. On glaciers of the Munch-Sardyk massif in Eastern Sayan. *Izvestiya Vsesoyuznogo geograficheskogo obshchestva*. Bulletin of the USSR Geographical Society. 1965, 97 (2): 176–180. [In Russian].
4. Kitov A.D., Kovalenko S.N., Plyusnin V.M. Results of 100-year observations on the dynamics of glacial geosystems on Munch-Sardyk massif. *Geografiya i prirodnye resursy*. Geography and Natural Resources. 2009, 3: 101–108. [In Russian].
5. Osipov E.Y., Ashmetiev A.Y., Osipova O.P., Klevtsov E.V. New glacier inventory of the south-eastern Eastern Sayan. *Led i Sneg*. Ice and snow. 2013, 3 (123): 45–54. [In Russian].
6. Paul F., Barry R., Cogley J., Frey H., Haeblerli W., Ohmura A., Ommanney C.S.L., Raup B., Rivera A., Zemp M. Recommendations for the compilation of glacier inventory data from digital sources. *Annals of Glaciology*. 2009, 50 (53): 119–126.
7. Electronic resource: Global Land Cover Facility. <http://www.landcover.org>
8. Farr T.G., Rosen P.A., Caro E., Crippen R., Duren R., Hensley S., Kobrick M., Paller M., Rodriguez E., Roth L., Seal D., Shaffer S., Shimada J., Umland J., Werner M., Oskin M., Burbank D., Alsdorf D. The Shuttle Radar Topography Mission. *Review Geophysics*. 2007, 45: 1–33. doi: 10.1029/2005RG000183.
9. Electronic resource: SRTM 90 m Digital Elevation Data. <http://srtm.csi.cgiar.org>
10. Bolch T., Menounos B., Wheate R. Landsat-based inventory of glaciers in western Canada, 1985–2005. *Remote Sensing Environment*. 2010, 114 (1): 127–137. doi: 10.1016/j.rse.2009.08.015.
11. Paul F., Kääb A. Perspectives on the production of a glacier inventory from multispectral satellite data in Arctic Canada: Cumberland Peninsula, Baffin Island. *Annals of Glaciology*. 2005, 42: 59–66.
12. Andreassen L.M., Paul F., Kääb A., Hausberg J.E. Landsat-derived glacier inventory for Jotunheimen, Norway, and deduced glacier changes since the 1930s. *The Cryosphere*. 2008, 2: 131–145. doi: 10.5194/tc-2-131-2008.
13. Electronic resource: RIHMI-WDC. <http://www.meteo.ru>
14. Electronic resource: Terrestrial Air Temperature: 1900–2010 Gridded Monthly Time Series (Version 3.01) http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/Global2011/README.GlobalTsT2011.html
15. Electronic resource: Terrestrial Precipitation: 1900–2010 Gridded Monthly Time Series (Ver-

- sion 3.01) http://climate.geog.udel.edu/~climate/html_pages/Global2011/README.GlobalTsP2011.html
16. *Osipov E.Y., Osipova O.P.* Glaciers of the Levaya Sygkta River watershed, Kodar Ridge, southeastern Siberia, Russia: modern morphology, climate conditions and changes over the past decades // *Environment Earth Sciences*. 2015. V. 74 (3). P. 1969–1984.
 17. *Fischer M., Huss M., Barboux C., Hoelzle M.* The new Swiss Glacier Inventory SGI2010: relevance of using high-resolution source data in areas dominated by very small glaciers // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2014. V. 46. № 4. P. 933–945.
 18. *Osipov E.Y., Osipova O.P.* Mountain glaciers of south-east Siberia: current state and changes since the Little Ice Age // *Annals of Glaciology*. 2014. V. 55 (66). P. 167–176.
 19. *Ганюшкин Д.А., Чистяков К.В., Кунаева Е.П., Волков И.В., Банцев Д.В.* Современное оледенение хребта Чихачёва (Юго-Восточный Алтай) и его динамика после максимума малого ледникового периода // *Лёд и Снег*. 2016. Т. 56. № 1. С. 29–42. doi: 10.15356/2076-6734-2016-1-29-42.
 20. *Gurney S.D., Popovnin V.V., Shahgedanova M., Stokes C.R.* A glacier inventory for the Buordakh Massif, Cherskiy Range, Northeast Siberia, and evidence for recent glacier recession // *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2008. V. 40. № 1. P. 81–88.
 21. *Stokes C.R., Shahgedanova M., Evans I.S., Popovnin V.V.* Accelerated loss of alpine glaciers in the Kodar Mountains, south-eastern Siberia // *Global and Planetary Change*. 2013. V. 101. P. 82–96.
 22. *Paul F., Kääb A., Maisch M., Kellenberger T., Haeblerli W.* Rapid disintegration of Alpine glaciers observed with satellite data // *Geophys. Research Letters*. 2004. V. 31: L21402. doi: 10.1029/2004GL020816.
 23. *Котляков В.М., Хромова Т.Е., Носенко Г.А., Попова В.В., Чернова Л.П., Муравьев А.Я.* Новые данные о современных изменениях ледников горных районов России // *ДАН*. 2015. Т. 464. № 6. С. 727–734.
 24. *Осипов Э.Ю., Осипова О.П.* Динамика оледенения в горах юга Восточной Сибири за последние 160 лет // *Лёд и Снег*. 2015. Т. 55. № 2 (130). С. 33–41. doi: 10.15356/2076-6734-2015-2-33-41.
 16. *Osipov E.Y., Osipova O.P.* Glaciers of the Levaya Sygkta River watershed, Kodar Ridge, southeastern Siberia, Russia: modern morphology, climate conditions and changes over the past decades. *Environment Earth Sciences*. 2015, 74 (3): 1969–1984.
 17. *Fischer M., Huss M., Barboux C., Hoelzle M.* The new Swiss Glacier Inventory SGI2010: relevance of using high-resolution source data in areas dominated by very small glaciers. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2014, 46 (4): 933–945.
 18. *Osipov E.Y., Osipova O.P.* Mountain glaciers of south-east Siberia: current state and changes since the Little Ice Age. *Annals of Glaciology*. 2014, 55 (66): 167–176.
 19. *Ganyushkin D.A., Chistyakov K.V., Kunaeva E.P., Volkov I.V., Bantsev D.V.* Current glaciation of the Chikhachev ridge (South-Eastern Altai) and its dynamics after maximum of the Little Ice Age. *Led i Sneg*. Ice and snow. 2016, 56 (1), 29–42. doi: 10.15356/2076-6734-2016-1-29-42. [In Russian].
 20. *Gurney S.D., Popovnin V.V., Shahgedanova M., Stokes C.R.* A glacier inventory for the Buordakh Massif, Cherskiy Range, Northeast Siberia, and evidence for recent glacier recession. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*. 2008, 40 (1): 81–88.
 21. *Stokes C.R., Shahgedanova M., Evans I.S., Popovnin V.V.* Accelerated loss of alpine glaciers in the Kodar Mountains, south-eastern Siberia. *Global and Planetary Change*. 2013, 101: 82–96.
 22. *Paul F., Kääb A., Maisch M., Kellenberger T., Haeblerli W.* Rapid disintegration of Alpine glaciers observed with satellite data. *Geophys. Research Letters*. 2004, 31: L21402. doi: 10.1029/2004GL020816.
 23. *Kotlyakov V.M., Khromova T.E., Nosenko G.A., Popova V.V., Chernova L.P., Murav'ev A.Y.* New data on current changes in the mountain glaciers of Russia. *Doklady Akademii Nauk*. *Doklady Earth Sciences*. 2015, 464 (6): 727–734. [In Russian].
 24. *Osipov E.Y., Osipova O.P.* Dynamics of glaciation in the South East Siberia Mountains over the past 160 years. *Led i Sneg*. Ice and snow. 2015, 55 (2): 33–41. doi: 10.15356/2076-6734-2015-2-33-41. [In Russian].