

И.В. Флоринский¹

ГЕОМОРФОМЕТРИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ И КАРТОГРАФИРОВАНИЕ АНТАРКТИЧЕСКОГО ОАЗИСА ХОЛМЫ ЛАРСЕМАНА

АННОТАЦИЯ

Геоморфометрические методы широко применяются в науках о Земле. Однако геоморфометрическое моделирование и картографирование антарктических оазисов до сих пор не проводилось. В статье приводятся первые результаты работ по геоморфометрическому моделированию и картографированию антарктического оазиса холмы Ларсеманн, полученные в сезон 68-й Российской антарктической экспедиции в январе–апреле 2023 г. В качестве исходных данных для расчетов и моделирования использовался фрагмент цифровой модели рельефа (ЦМР) Reference Elevation Model of Antarctica. По выделенной и отредактированной ЦМР были рассчитаны цифровые модели и построены карты 17 морфометрических характеристик: крутизна склона, экспозиция склона, горизонтальная кривизна, вертикальная кривизна, разностная кривизна, избыточная горизонтальная кривизна, избыточная вертикальная кривизна, аккумуляционная кривизна, кольцевая кривизна, минимальная кривизна, максимальная кривизна, средняя кривизна, Гауссова кривизна, несферичность, водосборная площадь, топографический индекс и индекс мощности потоков. Проведены работы по полевому геоморфометрическому дешифрированию, которое необходимо для корректных физико-географических и геолого-геоморфологических интерпретаций морфометрических карт. С этой целью пройдены 54 пеших маршрута общей длиной около 422 км, в ходе которых было отобрано 150 образцов горных пород для их последующего петрологического и минералогического анализа и трехмерного моделирования. Рассчитанные карты могут быть полезны для геологических, геоморфологических, почвенных, биологических, климатических и гидрологических исследований. Конечной целью многолетнего авторского проекта является создание цифрового геоморфометрического атласа антарктических оазисов и других свободных от оледенения территорий Антарктики.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: рельеф, цифровая модель рельефа, геоморфометрия, Антарктика

Igor V. Florinsky²

GEOMORPHOMETRIC MODELING AND MAPPING OF THE LARSEMANN HILLS ANTARCTIC OASIS

ABSTRACT

Geomorphometric modeling is widely used in geosciences. However, geomorphometric modeling and mapping of Antarctic oases has not been performed so far. This article presents the

¹ Институт математических проблем биологии РАН — филиал ФИЦ «Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН», Пущино, Московская обл., Россия, 142290, *e-mail: iflor@mail.ru*

² Institute of Mathematical Problems of Biology, Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow Region, 142290, Russia, *e-mail: iflor@mail.ru*

first results of geomorphometric modeling and mapping of the Larsemann Hills oasis obtained in the 68th Russian Antarctic Expedition in January–April 2023. As input data, we used a fragment of the Reference Elevation Model of Antarctica (REMA). From the extracted and edited digital elevation model, we derived models and maps of the following 17 morphometric variables: slope, aspect, horizontal curvature, vertical curvature, mean curvature, Gaussian curvature, minimal curvature, maximal curvature, unsphericity curvature, difference curvature, vertical excess curvature, horizontal excess curvature, ring curvature, accumulation curvature, catchment area, topographic index, and stream power index. We conducted a field geomorphometric interpretation to provide with correct physical geographic, geological, and geomorphological interpretations of morphometric maps. In this fieldwork, we carried out 54 foot routes with the total length of about 422 km. During the routes, we collected 150 rock samples for further petrological and mineralogical analyses and three-dimensional modeling of the samples. Morphometric maps can be useful for geological, geomorphological, soil, biological, and hydrological studies. The ultimate goal of the author's multiyear project is to create a digital geomorphometric atlas of Antarctic oases and other ice-free Antarctic territories.

KEYWORDS: topography, digital elevation model, geomorphometry, Antarctica

ВВЕДЕНИЕ

Антарктическими оазисами обычно называют свободные от ледникового покрова участки прибрежной зоны Антарктиды площадью от нескольких десятков до нескольких тысяч км², которые характеризуются:

- 1) местным климатом, в значительной мере определяемым окружающим ледниковым покровом;
- 2) наличием незамерзшей воды в виде системы сезонных ручьев и непромерзающих озер;
- 3) наличием примитивных почв и биоты [Симонов, 1971; Сократова, 2010].

Несмотря на относительно небольшие размеры, оазисы имеют важное научное и практическое значение. Благодаря своей доступности, они удобны для строительства круглогодичных станций и сезонных баз, а также обеспечивают возможность получать значительные объемы научного материала за короткий сезон [Сократова, 2010].

Геоморфометрия — научная дисциплина, лежащая на стыке геоинформатики, дистанционного зондирования, фотограмметрии и вычислительной математики, предметом которой является математическое моделирование и анализ рельефа, а также взаимосвязей между рельефом и другими компонентами геосистем [Evans, 1972; Shary, 1995; Shary et al., 2002; Geomorphometry..., 2009; Florinsky, 2016; 2017]. Геоморфометрия обладает развитой физико-математической теорией и мощным инструментарием вычислительных методов. Исходными данными для моделирования являются цифровые модели рельефа (ЦМР). Объектами моделирования обычно являются рельеф суши, подводный рельеф, поверхность ледников, подледниковый рельеф и рельеф внеземных территорий [Florinsky, 2017]. Геоморфометрические методы широко применяются для решения различных разномасштабных задач геоморфологии, гидрологии, почвоведения, геоботаники, лесоведения, геологии, океанологии, планетологии и других наук. Опыт исследований в области геоморфометрии обобщен в ряде обзоров и книг [Флоринский, 2021; Terrain Analysis..., 2000; Geomorphometry..., 2009; Florinsky, 2016; 2017; Wilson, 2018].

Перспективность геоморфометрического моделирования и картографирования антарктических оазисов достаточно очевидна как для получения новых знаний о количественных характеристиках рельефа этих уникальных территорий, так и для дальнейшего использования получаемой геоморфометрической информации для решения

фундаментальных и прикладных задач геоморфологии, геологии, геофизики, гляциологии, климатологии и др. Тем не менее, геоморфометрическое моделирование и картографирование антарктических оазисов до сих пор не проводилось.

В статье приводятся первые результаты работ по геоморфометрическому моделированию и картографированию антарктического оазиса холмы Ларсеманн, полученные автором в ходе выполнения его научной программы «Исследования по математико-картографическому моделированию рельефа в районе станции Прогресс, а также баз Молодежная и Гора Вечерняя и станций Новолазаревская и Беллинсгаузен» в сезон 68-й Российской антарктической экспедиции (РАЭ) в январе–апреле 2023 г. Конечной целью многолетнего проекта является создание геоморфометрического атласа антарктических оазисов и других свободных от оледенения территорий Антарктики.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Описание района исследования

Работа проводилась на холмах Ларсеманн в Восточной Антарктиде (рис. 1). Территория представляет собой антарктический прибрежный оазис, включающий свободные ото льда невысокие холмы площадью около 45 км², расположенные на юго-восточном побережье залива Прюдс моря Содружества, Берег Ингрид Кристенсен, Земля Принцессы Елизаветы. Оазис состоит из двух крупных полуостровов Стурнес и Брокнес, трех небольших — Гровнес, Браттневет и Стинеар и около 130 островов, в т. ч. трех относительно крупных — Фишер, Мэннинг и МакЛеод (рис. 1). Полуострова и острова разделены системой фьордов и бухт Тала, Нелла, Клеменс, Долкой, Уилкок, Куилти и др. Оазис ограничен с востока выводным ледником Долк, с юга — ледниковым плато и с запада — выводным ледником Поларарбокен.

Холмы Ларсеманн сложены протерозойскими гранат-биотит-силлиманитовыми гнейсами и сланцами, присутствуют интрузии пегматитов и гранитов [Stüwe et al., 1989; Carson, Grew, 2007; План управления, 2021]. На полуострове Стурнес развиты уникальные боросиликатные и фосфатные комплексы [План управления, 2014].

Холмы Ларсеманн освободились от ледникового покрова от 20 000 до 10 000 лет назад [Burgess et al., 1994; Kiernan et al., 2009]. Рельеф оазиса представляет собой структурно контролируемый экзарационный скалистый мелкосопочник [Большаинов, 2011]. Продолговатая форма крупных элементов местного рельефа объясняется наличием складок и разломов в метаморфических коренных породах [План управления, 2021]. Из экзогенных рельефообразующих процессов доминирует нивация. Ландшафт изрезан фьордами и долинами с крутыми склонами (рис. 1). Отметки высот лежат в пределах от 30 до 120 м. Максимальная высота составляет 158 м над уровнем моря (пик Бланделл). В оазисе имеется около 150 озер. Дренажная сеть не развита. Распространены снежники. На п-ове Стурнес расположен небольшой пассивный ледниковый купол.

Холмы Ларсеманн являются Особо управляемым районом Антарктики № 6 [План управления, 2021], а полуостров Стурнес и прилегающие районы — Особо охраняемым районом Антарктики № 174 (геологическим заказником) [План управления, 2014]. В оазисе находятся три круглогодичные полярные станции: Прогресс (Россия), Зонгсан (Китай) и Бхарати (Индия) (рис. 1). К югу от станции Прогресс на ледниковом плато расположен снежно-ледовый аэродром Зенит (Россия).

Геоморфометрическое моделирование

В качестве исходных данных для расчетов и моделирования автор использовал фрагмент ЦМР Reference Elevation Model of Antarctica (REMA) ver. 1.1 [Howat et al., 2019]. На сегодняшний день эта ЦМР, полученная фотограмметрическим способом по снимкам

космических аппаратов WorldView-1, WorldView-2 и WorldView-3, является наиболее полной и точной ЦМР территории Антарктиды.

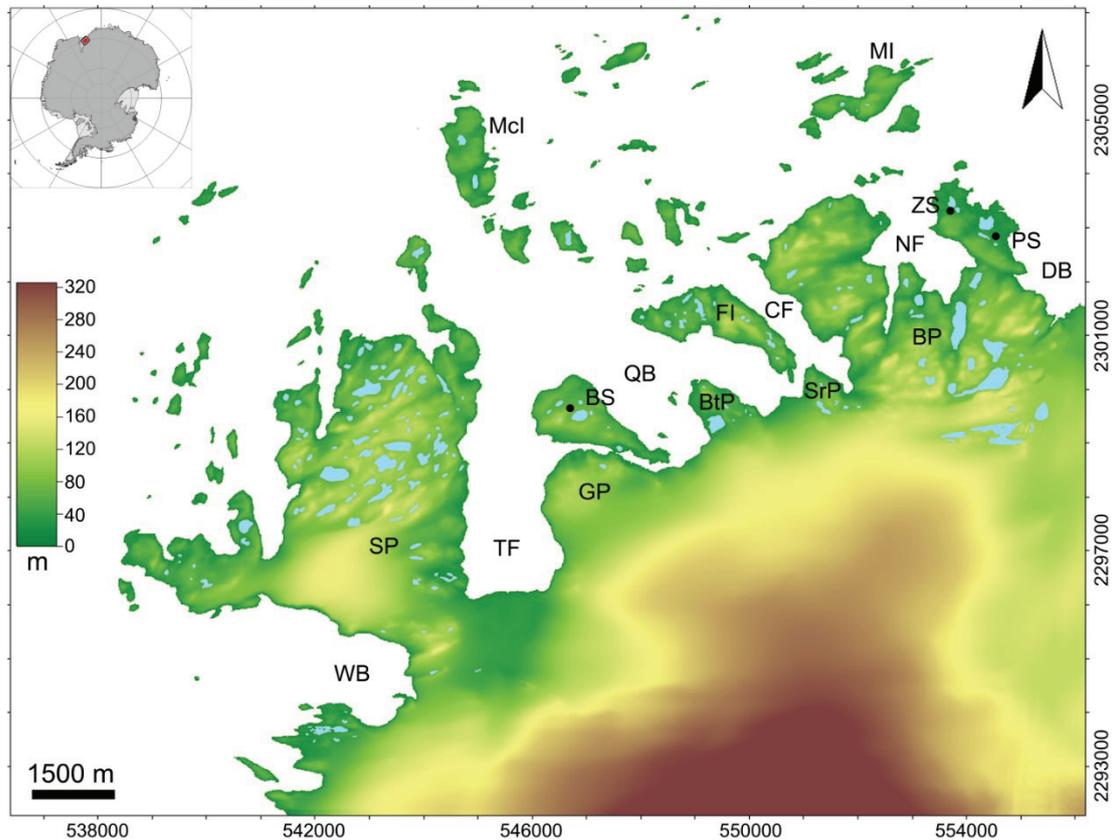


Рис. 1. Холмы Ларсеманн, географическое положение и высоты, м (выделены из ЦМР REMA [Howat et al., 2019]). Полуострова: BP — Брокнес, BtP — Браттневет, GP — Гровнес, SP — Стурнес, SrP — Стинеар; острова: FI — Фишер, MI — Мэннинг, Mcl — МакЛеод; фьорды: CF — Клеменс, NF — Нелла, TF — Тала; бухты: DB — Долкой, WB — Уилкок, QB — Килти; станции: PS — Прогресс (Россия), ZS — Зонгсан (Китай), BS — Бхарати (Индия)

Fig. 1. Larsemann Hills, the geographic location and elevations, m (extracted from the REMA DEM [Howat et al., 2019]). Peninsulas: BP — Broknes, BtP — Brattnevet, GP — Grovnes, SP — Stornes, SrP — Stinear; islands: FI — Fisher, MI — Manning, Mcl — McLeod; fjords: CF — Clemence, NF — Nella, TF — Thala; bays: DB — Dålkoj, WB — Wilcock, QB — Quilty; stations: PS — Progress (Russia), ZS — Zhogshan (China), BS — Bharati (India)

Предварительная оценка точности и качества ЦМР REMA показала, что в пределах оазиса она удовлетворяет требованиям геоморфометрического моделирования (низкий уровень высокочастотного шума, незначительное количество явных артефактов, достаточная гладкость поверхности, не требующая дополнительного сглаживания).

Для первичной обработки и редактирования ЦМР, геоморфометрических расчетов и картографирования использовалось программное обеспечение System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) Version 7.8.2 [Conrad et al., 2015].

Из ЦМР REMA автором был выделен фрагмент $18\,168 \times 14\,968$ м, включающий оазис и прилегающие участки ледникового плато и выводных ледников. ЦМР содержит 4 253 184 точек (матрица высот 2272×1872), шаг сетки ЦМР составляет 8 м. ЦМР REMA

не описывает рельеф морского дна, поэтому в выделенной ЦМР количество ячеек со значениями высот составляет 2 068 674.

ЦМР REMA представлена в полярной стереографической проекции (высоты даны относительно эллипсоида WGS84). Выделенная ЦМР была перепроектирована автором в проекцию UTM, зона 43S (рис. 1). Шаг сетки перепроектированной ЦМР составляет 8 м.

Затем автором в ручном режиме было проведено редактирование выделенной ЦМР для удаления артефактов — «островов», которые являются образами айсбергов. При этом в качестве справочного материала использовалась карта [Larsemann Hills, 2005].

По отредактированной ЦМР для территории оазиса автором были рассчитаны цифровые модели 17 морфометрических величин. К ним относятся 14 локальных морфометрических величин: крутизна (G), экспозиция (A), горизонтальная кривизна (k_h), вертикальная кривизна (k_v), разностная кривизна (E), избыточная горизонтальная кривизна (k_{he}), избыточная вертикальная кривизна (k_{ve}), аккумуляционная кривизна (K_a), кольцевая кривизна (K_r), минимальная кривизна (k_{min}), максимальная кривизна (k_{max}), средняя кривизна (H), Гауссова кривизна (K), несферичность (M); одна нелокальная морфометрическая величина — водосборная площадь (CA), а также 2 комбинированные величины: топографический индекс (TI) и индекс мощности потоков (SI). Определения, формулы и интерпретации этих величин см. [Florinsky, 2016; 2017].

Возможности SAGA позволяют проводить непосредственный расчет цифровых моделей лишь части указанных морфометрических величин. В частности, непосредственно методом Эванса [Evans, 1972] автором были рассчитаны модели 6 локальных морфометрических величин: G , A , k_h , k_v , k_{min} и k_{max} . Модели остальных 8 локальных морфометрических величин — E , k_{he} , k_{ve} , K_a , K_r , H , K и M — были последовательно рассчитаны с использованием их формул и опции SAGA, позволяющей проводить арифметические действия с растровыми слоями. Аналогично, после расчета в SAGA модели total catchment area, на ее основе автором были получены модели CA , TI и SI . При расчете двух последних также использовалась рассчитанная ранее модель G .

В ЦМР REMA отсутствует батиметрия озер, но ячейки ЦМР, соответствующие озерам, не обозначены “no data value” как морская акватория, а содержат значения «высот», полученные путем интерполяции береговых высот, т. е. являются артефактами. В этой связи озера на всех рассчитанных картах были маскированы. Для создания маски озер использовалась карта [Larsemann Hills, 2005].

По рассчитанным моделям были построены карты этих морфометрических величин (рис. 2–9). Все карты представлены в проекции UTM, зона 43S.

Полевые работы

Полевое геоморфометрическое дешифрирование необходимо преимущественно для проведения корректных физико-географических и геолого-геоморфологических интерпретаций элементов изображения морфометрических карт.

Полевое геоморфометрическое дешифрирование основано на прохождении сетки пеших маршрутов по территории, на которую составляются морфометрические карты. Для пространственного разрешения карт оазиса Ларсеманн, рассчитанных по цифровой модели рельефа REMA с шагом сетки 8 м; расстояние между маршрутами может составлять 300–500 м в зависимости от типа рельефа, крутизны склона, типа поверхности (скалы, курумы, снежники), наличия озер и других элементов ландшафта, оказывающих влияние на возможность и скорость передвижения в пешем порядке.

Оптимальная длина и длительность пешего маршрута геоморфометрического дешифрирования в условиях сильно пересеченной местности и антарктического климата в летний сезон составляет 6–10 км и 5–8 ч. соответственно. При таком режиме возможно

проведение полевых работ ежедневно в течение длительного времени (месяц и более) без ухудшения качества работ из-за физической или психологической усталости.

Запланированный маршрут может корректироваться в ходе его прохождения в зависимости от реальных условий местности и погоды. В частности, в сезон легкий снегопад и ветер со скоростью до 10 м/с при температурах от 5 до -5 °С в целом не препятствуют прохождению маршрута (снег сдувается со склонов и приводораздельных участков и, как правило, тает на следующий день). Вместе с тем, в конце февраля сильный многодневный снегопад или метель при температурах от -5 до -15 °С может существенно осложнить или приостановить на неопределенное время полевые работы, т. к. проходимость местности становится проблематичной из-за возникающего рыхлого снежного покрова толщиной до полуметра на склонах и более в понижениях рельефа. Этот снег уже не растает до следующего лета. В то же время ветер со скоростью 30–40 м/с, как правило, может за сутки сдуть рыхлый снег со склонов, а несколько солнечных дней с температурами воздуха порядка -20 °С приводят к образованию прочного наста в понижениях и на снежниках. В результате проходимость местности восстанавливается.

В ходе полевого геоморфометрического дешифрирования автором проводились: 1) сравнительный визуальный анализ элементов реального рельефа местности и их отображения на морфометрических картах; 2) отбор геологических образцов для их последующего петрологического и минералогического анализа и уточнения имеющейся геологической информации с целью изучения связей между статистическими характеристиками морфометрических моделей и свойствами горных пород, слагающих картографируемые территории, а также для создания цифровых трехмерных (3D) моделей образцов для иллюстрирования разрабатываемого геоморфометрического атласа.

В сезон 68 РАЭ в оазисе Ларсеманн автором самостоятельно были пройдены 54 пеших маршрута геоморфометрического дешифрирования¹, общая длина которых составила около 422 км (рис. 10, табл. 1). В ходе маршрутов автором были отобраны 150 образцов горных пород со средними размерами от $10 \times 5 \times 5$ до $25 \times 20 \times 10$ см (рис. 10). Также в ходе маршрутов проводилось подробное фотографирование проходимых ландшафтов; фотографии необходимы для постэкспедиционного анализа рассчитанных карт и иллюстрирования создаваемого геоморфометрического атласа.

Подчеркнем: полевое геоморфометрическое дешифрирование служит проведению корректных физико-географических и геолого-геоморфологических интерпретаций морфометрических карт и не требует выполнения каких-либо полевых измерений. Метрическая составляющая работы проводится камерально, еще до выхода в поле и состоит в математически строгих расчетах морфометрических моделей и карт. Для атласного геоморфометрического картографирования какие-либо полевые измерения тоже не требуются; необходимы визуальные наблюдения картографируемой территории.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты

Фрагменты некоторых морфометрических карт оазиса представлены на рис. 2–9.

Карта *G* (рис. 2) отображает пространственное распределение крутизны склонов. Наиболее крутые склоны имеют горные массивы Стена (южный Брокнес), хребет Расти и утес Каствл (западный Брокнес), безымянная гора к югу от холма Кантербери, а также береговые склоны северо-западного Брокнеса и южного Стурнеса (где они совпадают с краевым обрывом пассивного ледникового купола Стурнес). Несмотря на невысокие

¹ Полуостров Стурнес является Особо охраняемым районом Антарктики (ООРА) № 174 [План управления, 2014]. Для работы на его территории было получено разрешение в Росгидромете.

отметки высот и использование для описания рельефа терминов «холмы», «мелкосопочник», на многих местах рельеф производит впечатление скалистых гор.

Карта A отображает пространственное распределение экспозиции склонов. Значительная часть склонов у вытянутых холмов Брокнеса и Стурнеса ориентирована на северо-запад и юго-восток, соответствуя общей разрывной структуре региона. Склоны холмов п-овов Гровнес, Браттневет, Стинеар и о. Фишер как бы вклиниваются между Брокнесом и Стурнесом и ориентированы преимущественно на юго-запад и северо-восток. Это может служить косвенным признаком различия геологического происхождения и/или развития этих двух групп территорий.

Карта k_h (рис. 3) отображает распределение зон конвергенции и дивергенции поверхностных потоков ($k_h < 0$ и $k_h > 0$, соответственно). В геоморфологическом смысле это отроги долин и приводораздельных областей (синие и коричневые оттенки соответственно). В комбинации, зоны конвергенции и дивергенции отображают потоковую структуру местности, которая здесь, очевидно, структурно предопределена.

Карта k_v (рис. 4) отображает пространственное распределение зон относительного замедления и ускорения поверхностных потоков ($k_v < 0$ и $k_v > 0$, соответственно). В геоморфологическом плане на этой карте можно видеть области резкого перепада высот (эскарпы, обрывы и т. п.). Также на карте хорошо читается линеаментная сеть территории.

Карты k_{min} и k_{max} (рис. 5 и 6) целесообразно рассматривать совместно. Их анализ позволяет выявить два типа вытянутых линейных форм: вогнутые — долины и подножия склонов, которые отображаются темно-синими линиями (рис. 5, $k_{min} < 0$) и выпуклые — хребты и бровки склонов, которые отображаются темно-коричневыми линиями (рис. 6, $k_{max} > 0$). С точки зрения выявления геологических линеаментов (разломов, складок и т. п.) территории этого оазиса карты k_{min} и k_{max} являются наиболее информативным материалом, т. к. все линеаменты видны на этих картах невооруженным глазом и их выявление не требуют дополнительной обработки изображения этих карт.

Карты других типов кривизн, на первый взгляд, не несут существенно новой информации, по сравнению с картами наиболее популярных в науках о Земле четверки кривизн k_h , k_v , k_{min} и k_{max} , которые рассмотрены выше. Здесь необходимо отметить, что рассчитанные 12 типов кривизн входят в математически полную систему кривизн поверхности [Shary, 1995]. С точки зрения теории геоморфометрии их совместное применение и анализ имеет фундаментальный характер. Рассмотрим далее кратко полученные карты других кривизн.

H представляет два механизма аккумуляции потоков — конвергенцию и относительное замедление — с равными весами. Поэтому неудивительно, что карта H визуально представляет собой некую среднюю картину карт k_h и k_v (рис. 3 и 4). K сохраняет свои значения после изгибания поверхности, если оно произошло без растяжений, сжатий и разрывов. Карта K может быть полезна в геологических исследованиях эволюции рельефа оазиса.

E показывает, насколько сильнее выражен один из двух механизмов аккумуляции поверхностных потоков под действием гравитации — относительное замедление потоков (за которое отвечает k_v), по сравнению с другим механизмом — конвергенцией потоков (за которую отвечает k_h) в данной точке поверхности. Карта E может применяться для сравнительного анализа преобладания механизмов аккумуляции потоков вещества в седиментологии. Для этих же целей может применяться карта K_a , т. к. эта морфометрическая величина оценивает степень аккумуляции потоков.

k_{he} показывает, насколько сильнее изогнуто нормальное сечение, тангенциальное горизонталью по сравнению с минимальным изгибом топографической поверхности в данной точке. k_{ve} показывает, насколько сильнее изогнуто нормальное сечение, имеющее общую касательную с линией скольжения по сравнению с минимальным изгибом

поверхности в данной точке. M показывает, насколько форма элемента поверхности отклоняется от сферической (рис. 7). K_r описывает степень извилистости потоков.

CA является мерой площади участков, которые могут дренироваться через данную точку. В результате на карте CA (рис. 8) в виде светлых и темных линий (низкие и высокие значения CA) ясно выделяются хребты и долины. На карте CA видна потоковая структура ледников, существенно отличающаяся от структуры оазиса по рисунку карты.

PI является мерой степени аккумуляции потоков. Чем больше водосборная площадь и чем меньше крутизна склонов, тем выше значение топографического индекса и тем больше потенциальное накопление влаги в приповерхностном слое (рис. 9). SI является мерой потенциальной эрозионной силы поверхностных потоков. Чем больше водосборная площадь и крутизна склонов, тем выше значение SI .

В сезон 68 РАЭ большая часть территории оазиса холмы Ларсеманн была покрыта автором достаточно плотной сеткой маршрутов геоморфометрического дешифрирования (общей длиной около 422 км) и сеткой отбора геологических образцов (150 ед.) (рис. 10). Это позволяет рассчитывать на успешное проведение следующих постэкспедиционных этапов работы по авторскому проекту (см. следующий раздел).

Обсуждение

Цифровые геоморфометрические модели и карты территории оазиса холмы Ларсеманн могут быть полезны прежде всего для выявления и картографирования выраженных в рельефе разрывных нарушений и складок [Florinsky, 2016, chaps. 13, 14], которые отображаются на картах кривизн в виде линеаментов (рис. 3–7). Как уже отмечалось в предыдущем разделе, в условиях рельефа данного региона для этих целей наиболее полезными оказались карты k_{min} и k_{max} (рис. 5 и 6). Карты остальных типов кривизн могут использоваться для уточнения положения, геометрии и типа разломов и складок, выявленных по картам k_{min} и k_{max} .

Территория оазиса в геологическом плане является в целом открытой, т. е. отсутствуют почвенный и растительный покровы, четвертичные отложения встречаются в отдельных долинах и впадинах, а выходы коренных пород наблюдаются повсеместно. Поэтому полевая верификация выявленных линеаментов в большинстве случаев не может вызывать существенных затруднений (проблемой являются снежники на п-ове Стурнес).

Совместное использование моделей k_h и k_v (рис. 3 и 4) позволяет выявлять зоны относительной аккумуляции поверхностных потоков, которые одновременно являются узлами пересечения разрывных нарушений и характеризуются повышенной раздробленностью и проницаемостью горных пород [Florinsky, 2016, chap. 15]. В этих зонах происходит взаимодействие и обмен между двумя потоками веществ:

- 1) латеральным потоком веществ, перемещаемых вдоль земной поверхности и в приповерхностном слое под действием гравитации (вода, растворенные и взвешенные в ней вещества);
- 2) вертикальным восходящим потоком веществ (флюиды, подземные воды различной минерализации и температуры).

Карта зон аккумуляции/узловых структур, построенная по моделям k_h и k_v , может быть полезна для геохимических и минералогических исследований оазиса, особенно полуострова Стурнес, где развиты боросиликатные и фосфатные комплексы, происхождение которых до конца не ясно.

Известно, что рельеф во многом определяет тепловой, ветровой и гидрологический режим склонов, контролируя таким образом распределение и свойства почв и растительного покрова [Florinsky, 2016, chap. 9]. В частности, информация о G и A ,

совместно с данными о положении Солнца может быть использована для расчета моделей инсоляции местности, а совместно с данными о розе ветров — для создания карт наветренных и подветренных склонов, прогноза пространственной дифференциации снегонакопления и выявления участков, защищенных от ветрового воздействия.

Такая информация важна для почвенных, геоботанических и экологических исследований оазиса, где одним из основных метеорологических факторов, определяющих микроклимат, является сильный постоянный кatabатический ветер. Информация о дифференциации склонов по уровню инсоляции и об участках, защищенных от ветрового воздействия, может быть полезна для уточнения и прогноза распределения в оазисе примитивных почв [Мергелов, 2014] и растительности (мхи, лишайники, водоросли) [Gupta, 2015]. Для уточнения такого прогноза может быть полезна карта *Т1* (рис. 9), которая отображает морфометрические предпосылки путей миграции и областей аккумуляции жидкой влаги в ландшафте в летний период.

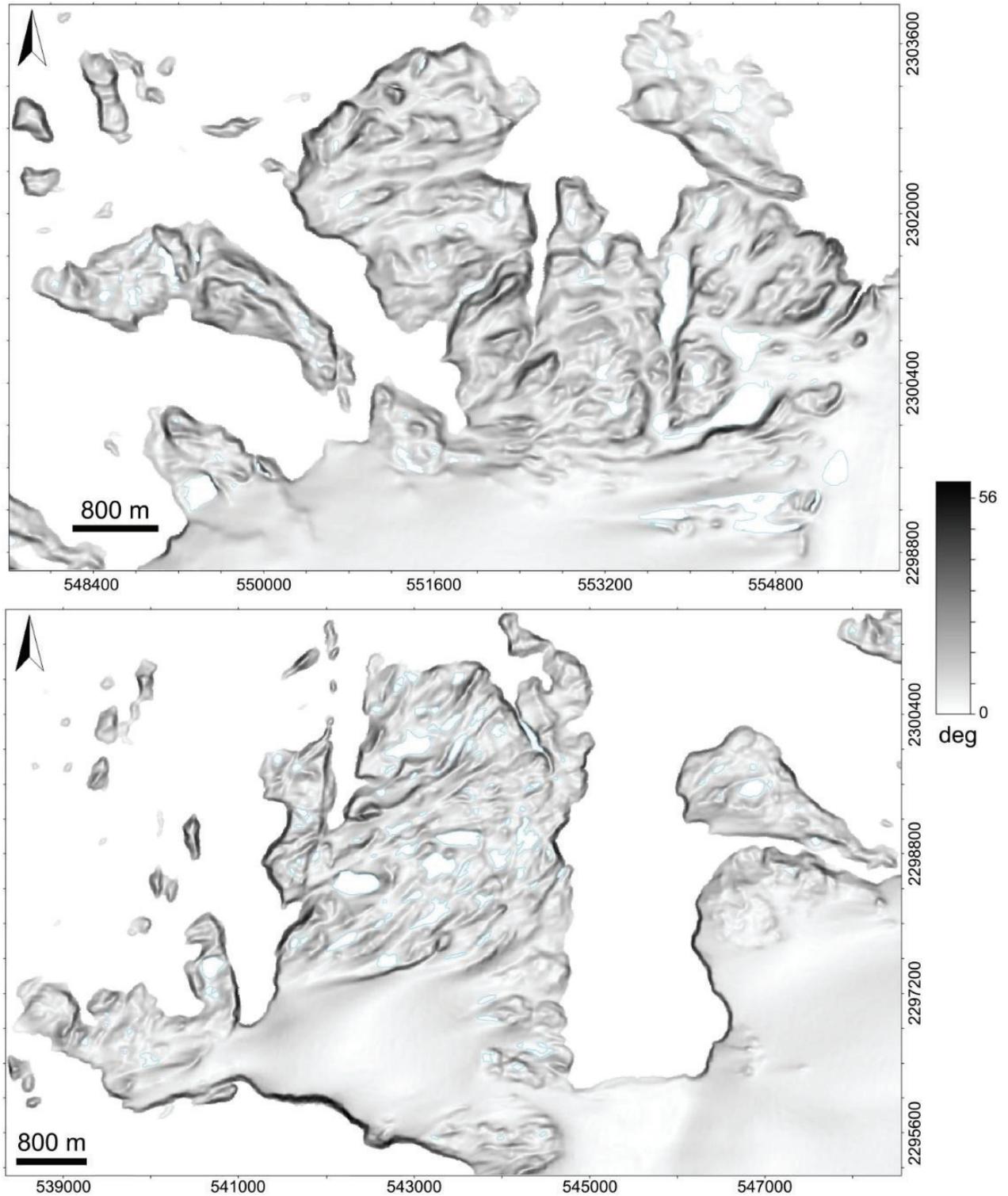
Для территории оазиса актуальна задача мониторинга и прогноза прорыва озер (часть которых являются каскадными системами), которые на п-ове Брокнес могут представлять угрозу для связности ст. Прогресс с аэродромом Зенит и ст. Восток [Боронина, 2022]. На карте *Т1* (рис. 9, верх) в восточной и юго-восточной части Брокнеса видны потенциальные пути сброса паводковых вод (узкие красные зоны) из о. LH73 в о. Прогресс, затем в о. Сибторп и далее по каньону в бухту Долкой, а также из о. Боулдер к зоне провала 2017 г. на леднике Долк и далее в сторону бухты Долкой. Таким образом, *Т1* может применяться для выявления морфометрических предпосылок путей сброса паводковых вод по озерным каскадам оазиса.

Все типы кривизн являются функциями первых и вторых частных производных высоты, поэтому они чувствительны к незначительным перепадам значений высоты [Florinsky, 2016, chap. 5], в т. ч. к высокочастотному шуму и артефактам. Как уже отмечалось, использованный фрагмент ЦМР REMA характеризуется достаточной гладкостью и практически полным отсутствием видимого высокочастотного шума (рассчитанные карты хорошо читаются). Вместе с тем на всех картах кривизн (рис. 3–7) хорошо виден специально не удаленный автором артефакт — линеамент, проходящий под косым углом на севере западного Брокнеса и отсекающий п-ов Миррор от остальной части восточного Брокнеса. Это след сшивки двух тайлов ЦМР REMA.

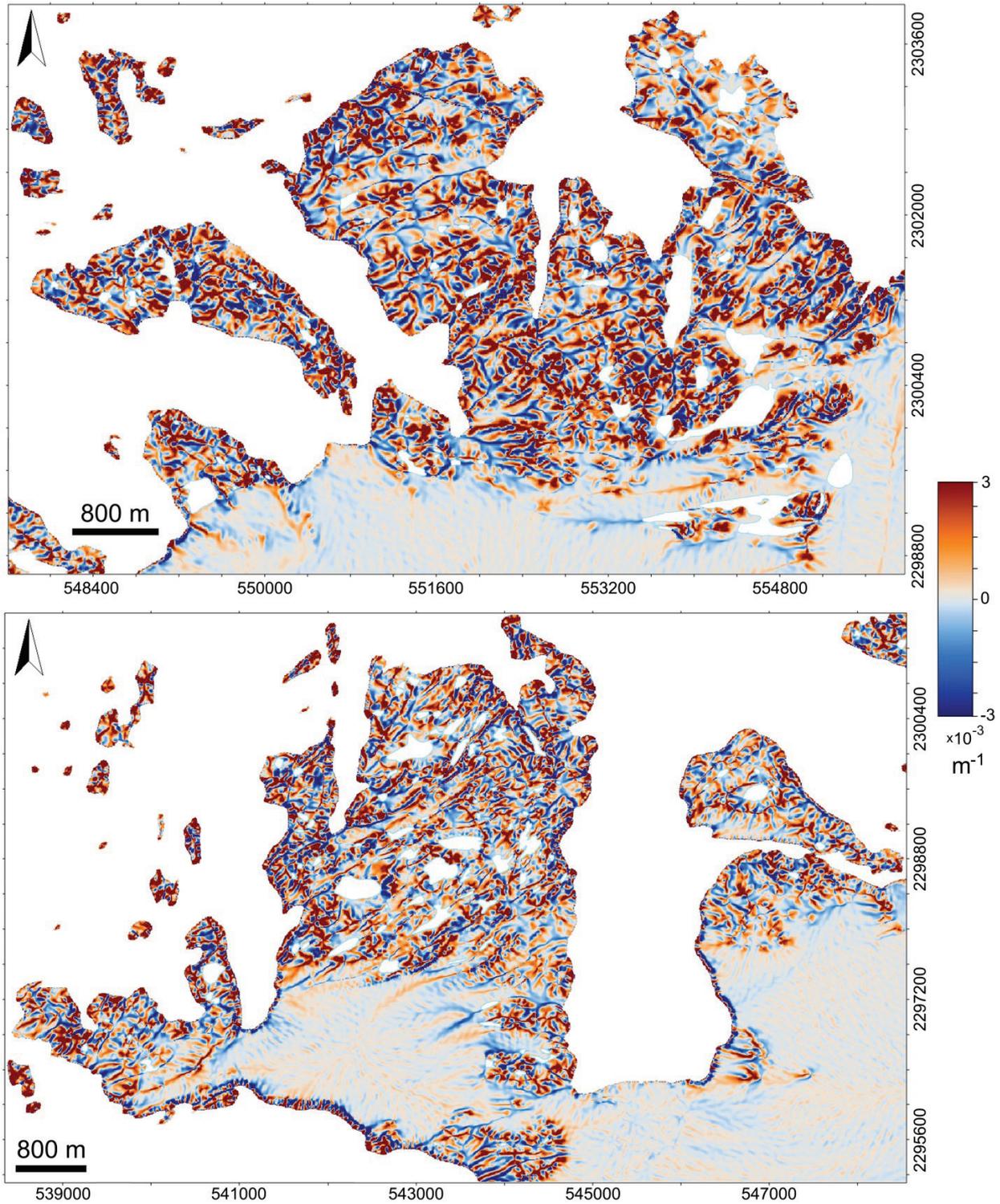
Чувствительность кривизн к малым изменениям высоты проявляется также в различном «стиле» отображения на картах кривизн участков оазиса, свободных ото льда, и поверхности ледников. Территория оазиса окрашена контрастными цветами или оттенками одного цвета, что объясняется существенными изменениями значений кривизн, в то время как ледники окрашены блеклыми цветами или оттенками одного цвета, что является следствием незначительных изменений значений кривизн (рис. 3–7).

В постэкспедиционный период отобранные образцы пород будут использованы для решения двух задач. Во-первых, будет проведен петрологический и минералогический анализ образцов, который призван уточнить информацию о возрасте и составе пород исследуемой территории, доступную по существующей, но излишне генерализованной геологической карте оазиса [Carson, Grew, 2007]. Полученные в результате данные должны способствовать выявлению и анализу связей между статистическими характеристиками морфометрических моделей и возрастом/составом горных пород.

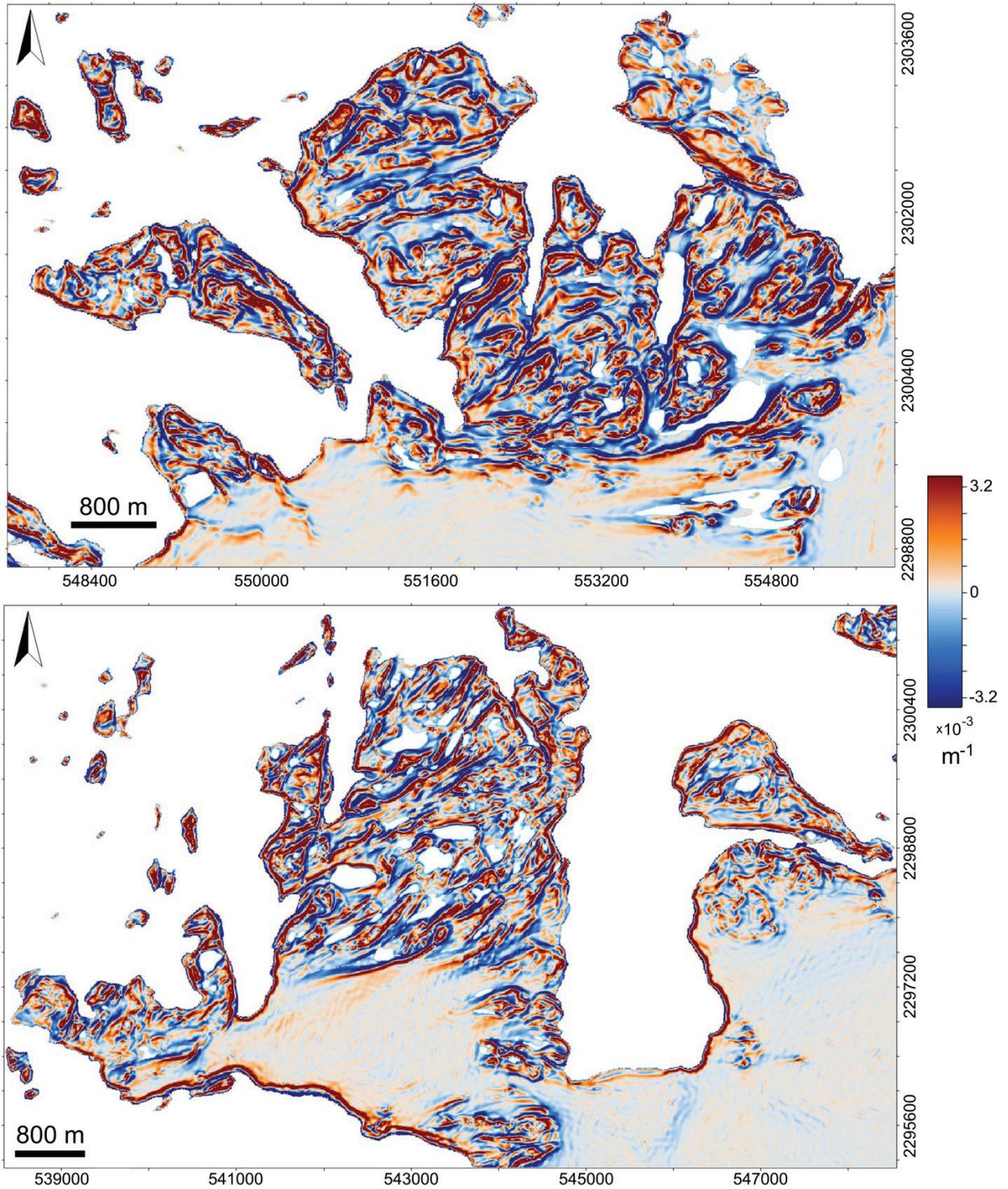
Во-вторых, методами цифровой фотограмметрической музеефикации [Дрыга, 2019] будут созданы цифровые трехмерные модели отобранных образцов, которые будут использованы при составлении цифрового геоморфометрического атласа антарктических оазисов для иллюстрации петрологической и минералогической компоненты картографируемых ландшафтов оазиса.



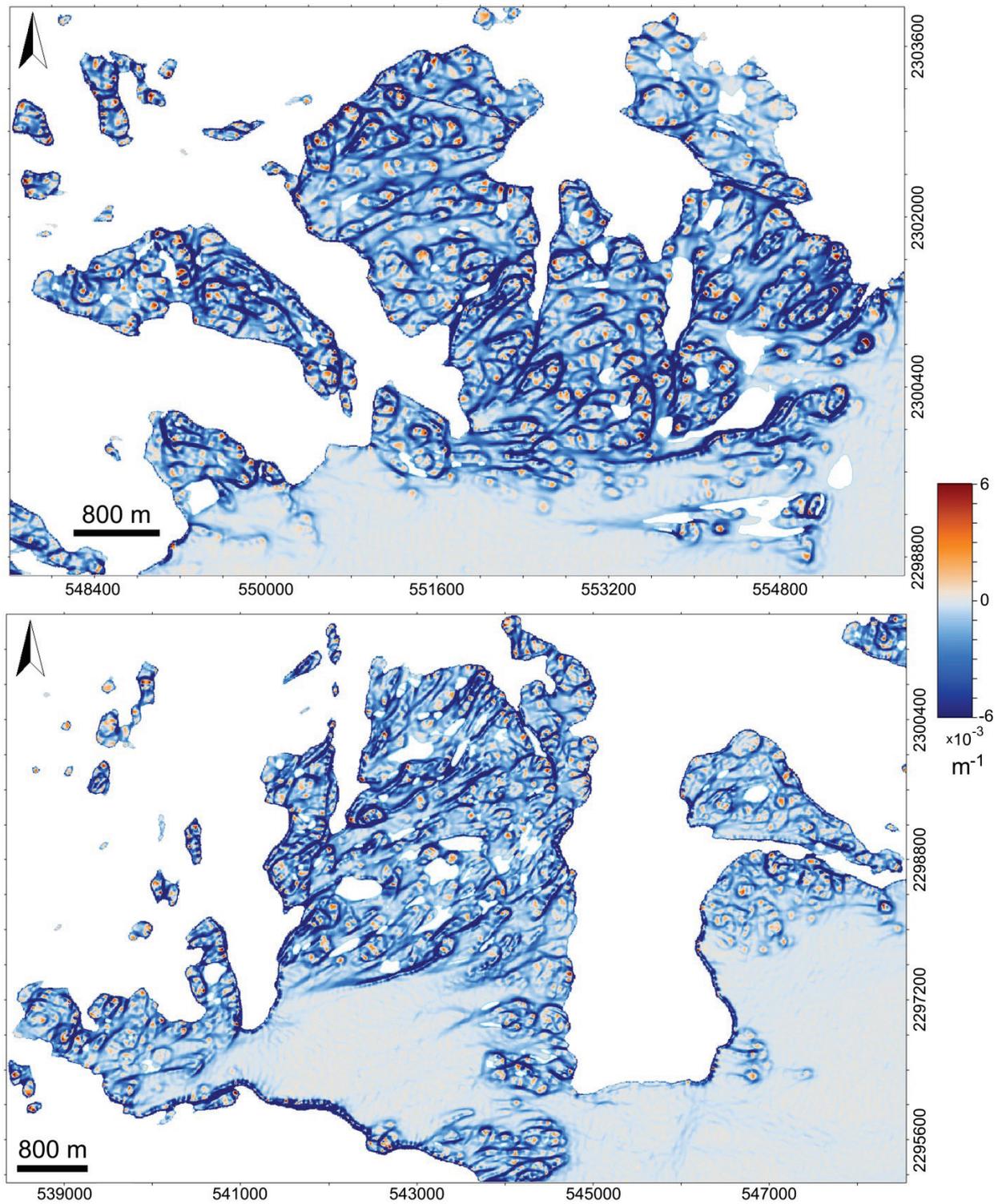
*Рис. 2. Холмы Ларсеманн, крутизна склона, °.
Вверху — п-ов Брокнес, внизу — п-ов Стурнес
Fig. 2. Larsemann Hills, slope, °.
Above is the Broknes Peninsula, below — the Stornes Peninsula*



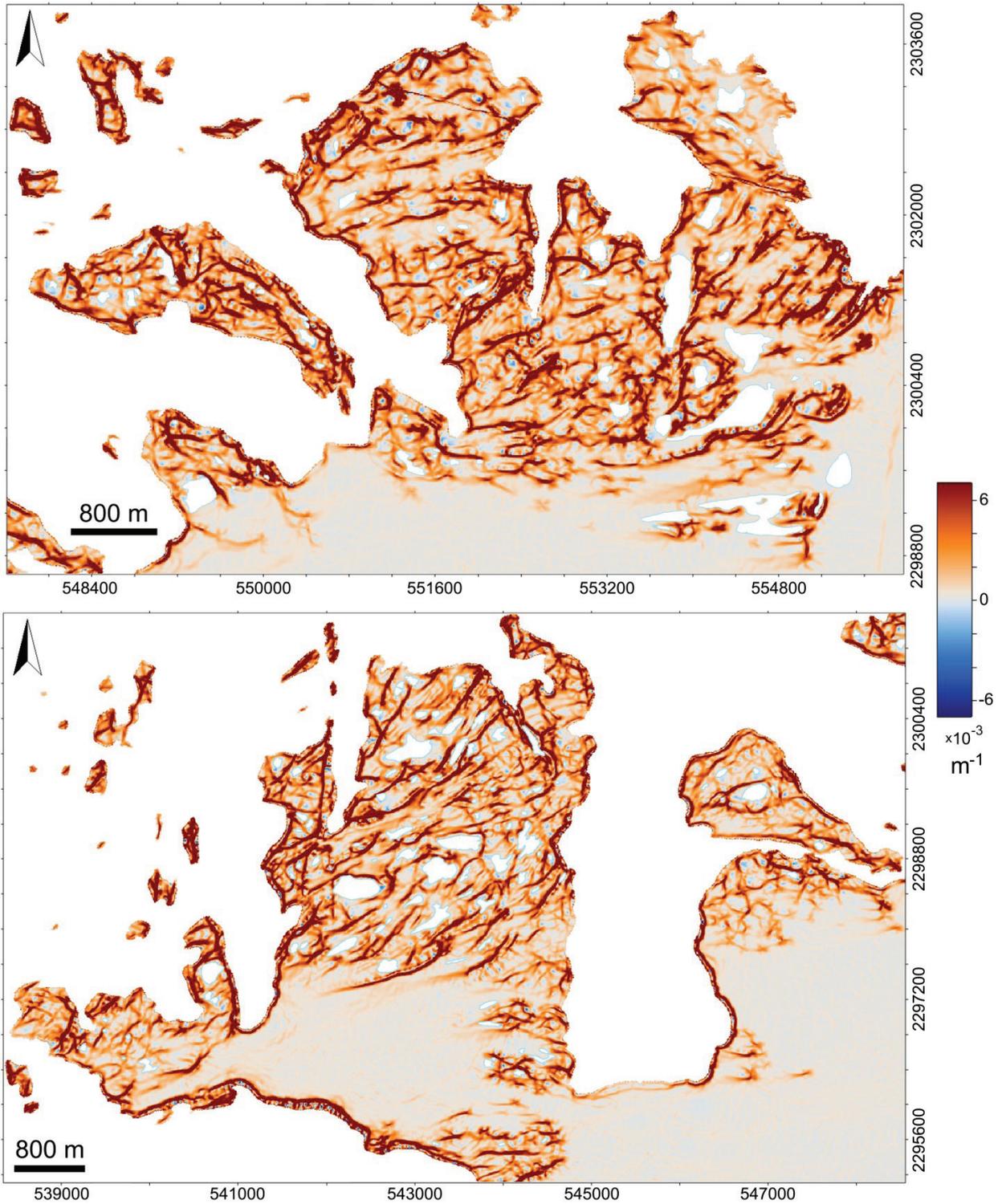
*Рис. 3. Холмы Ларсеманн, горизонтальная кривизна, m^{-1} .
Вверху — п-ов Брокнес, внизу — п-ов Стурнес
Fig. 3. Larsemann Hills, horizontal curvature, m^{-1} .
Above is the Broknes Peninsula, below — the Stornes Peninsula*



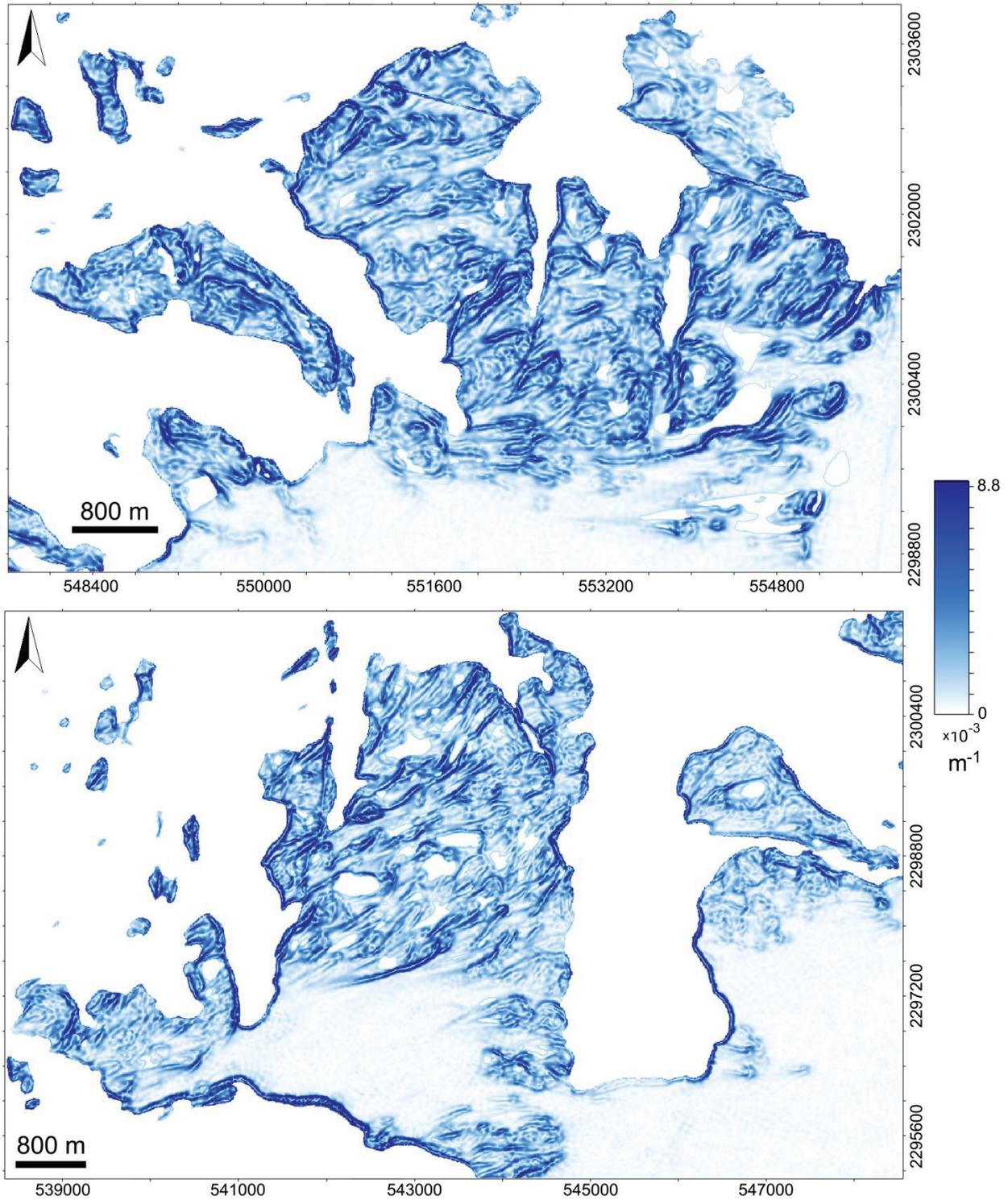
*Рис. 4. Холмы Ларсеманн, вертикальная кривизна, m^{-1} .
Вверху — п-ов Брокнес, внизу — п-ов Стурнес
Fig. 4. Larsemann Hills, vertical curvature, m^{-1} .
Above is the Broknes Peninsula, below — the Stornes Peninsula*



*Рис. 5. Холмы Ларсеманн, минимальная кривизна, m^{-1} .
Вверху — п-ов Брокнес, внизу — п-ов Стурнес
Fig. 5. Larsemann Hills, minimal curvature, m^{-1} .
Above is the Broknes Peninsula, below — the Stornes Peninsula*



*Рис. 6. Холмы Ларсеманн, максимальная кривизна, m^{-1} .
Вверху — п-ов Брокнес, внизу — п-ов Стурнес
Fig. 6. Larsemann Hills, maximal curvature, m^{-1} .
Above is the Broknes Peninsula, below — the Stornes Peninsula*



*Рис. 7. Холмы Ларсеманн, несферичность, м^{-1} .
Вверху — п-ов Брокнес, внизу — п-ов Стурнес
Fig. 7. Larsemann Hills, unsphericity curvature, м^{-1} .
Above is the Broknes Peninsula, below — the Stornes Peninsula*

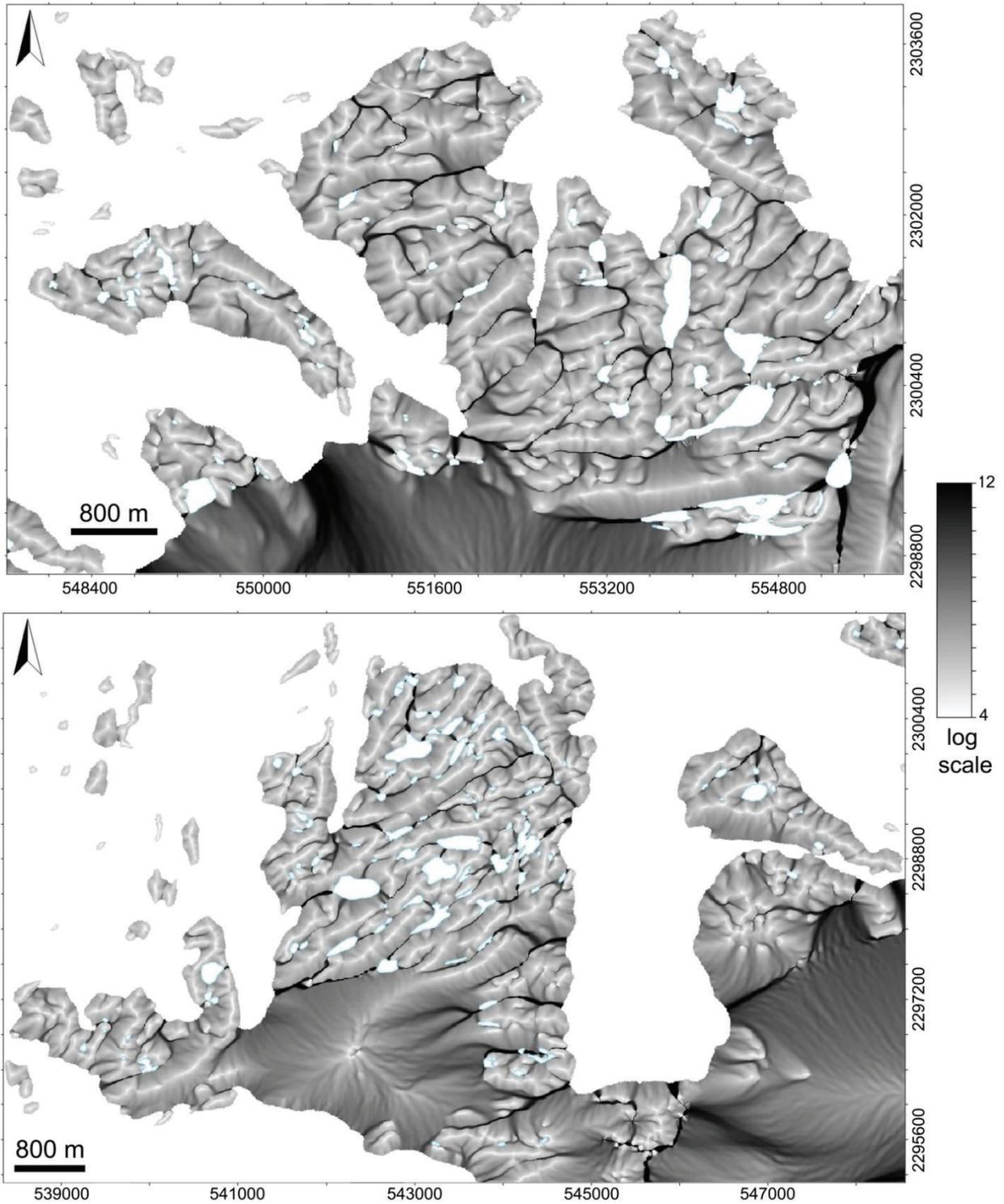


Рис. 8. Холмы Ларсеманн, водосборная площадь, логарифмическая шкала.

Вверху — п-ов Брокнес, внизу — п-ов Стурнес

Fig. 8. Larsemann Hills, catchment area, logarithmic scale.

Above is the Broknes Peninsula, below — the Stornes Peninsula

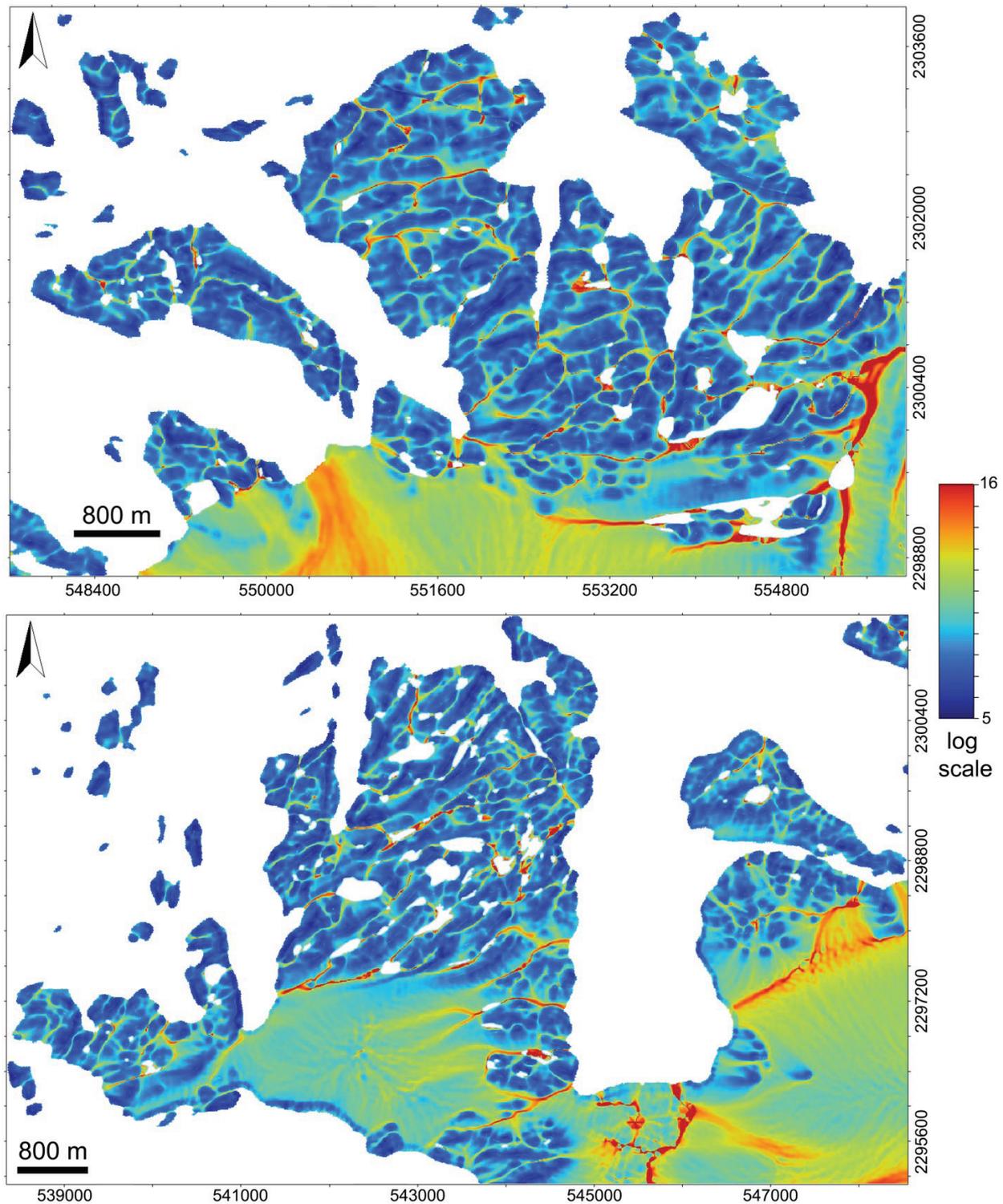
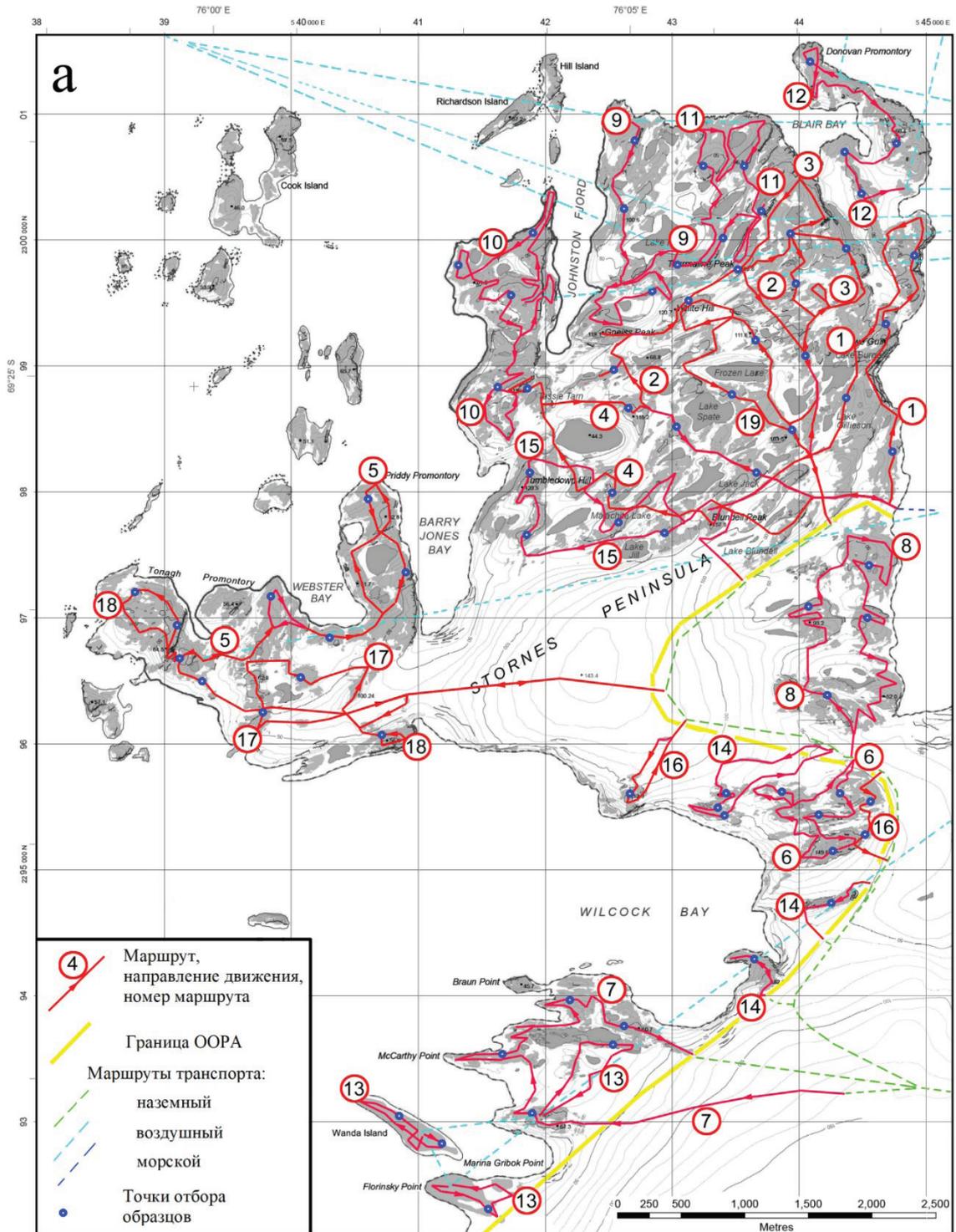


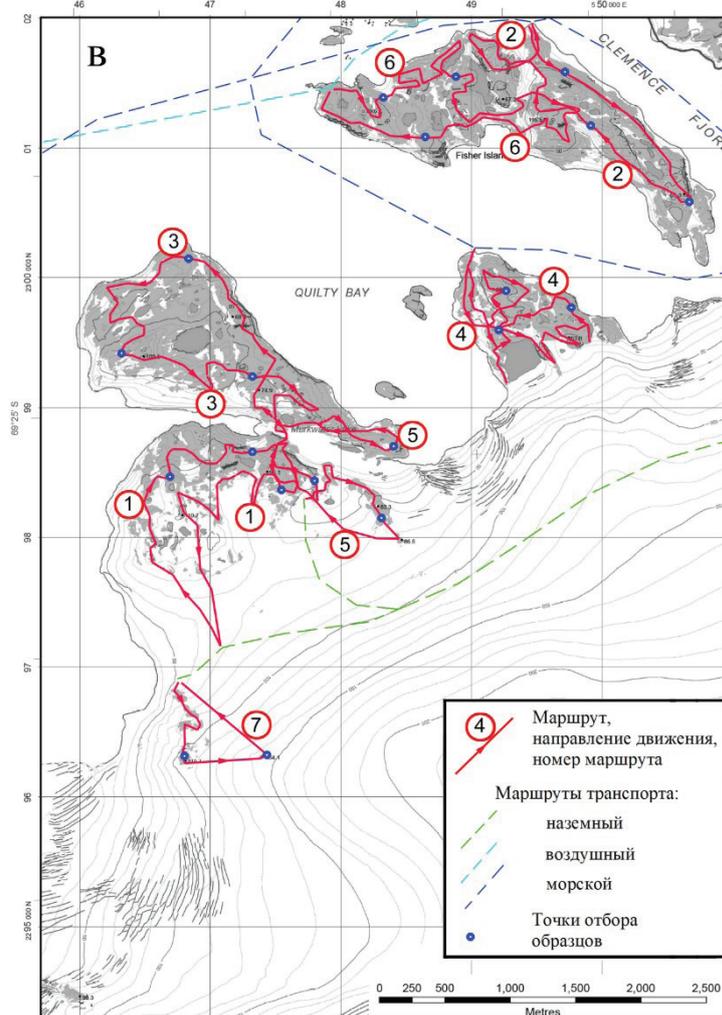
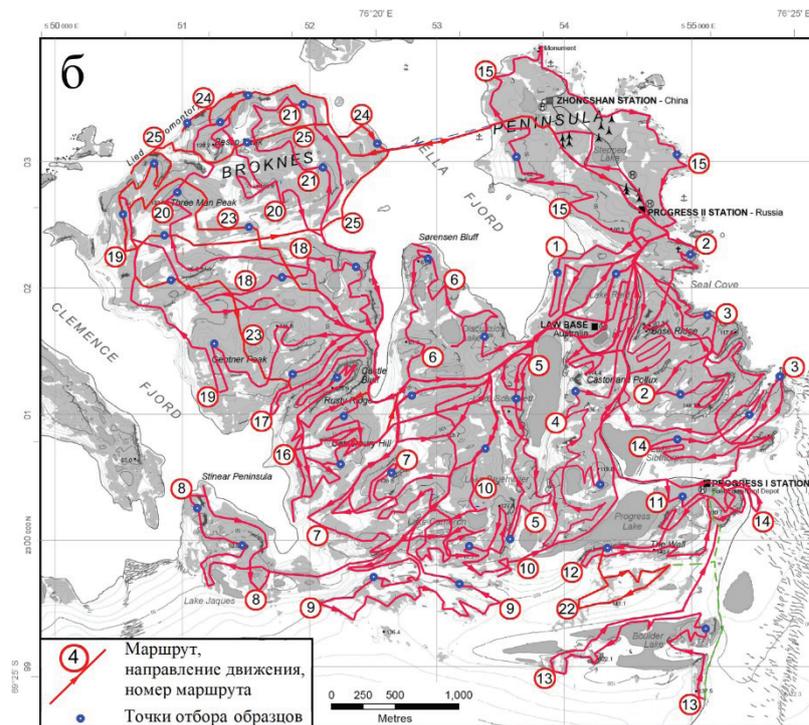
Рис. 9. Холмы Ларсеманн, топографический индекс, логарифмическая шкала.

Вверху — п-ов Брокнес, внизу — п-ов Стурнес

Fig. 9. Larsemann Hills, topographic index, logarithmic scale.

Above is the Broknes Peninsula, below — the Stornes Peninsula





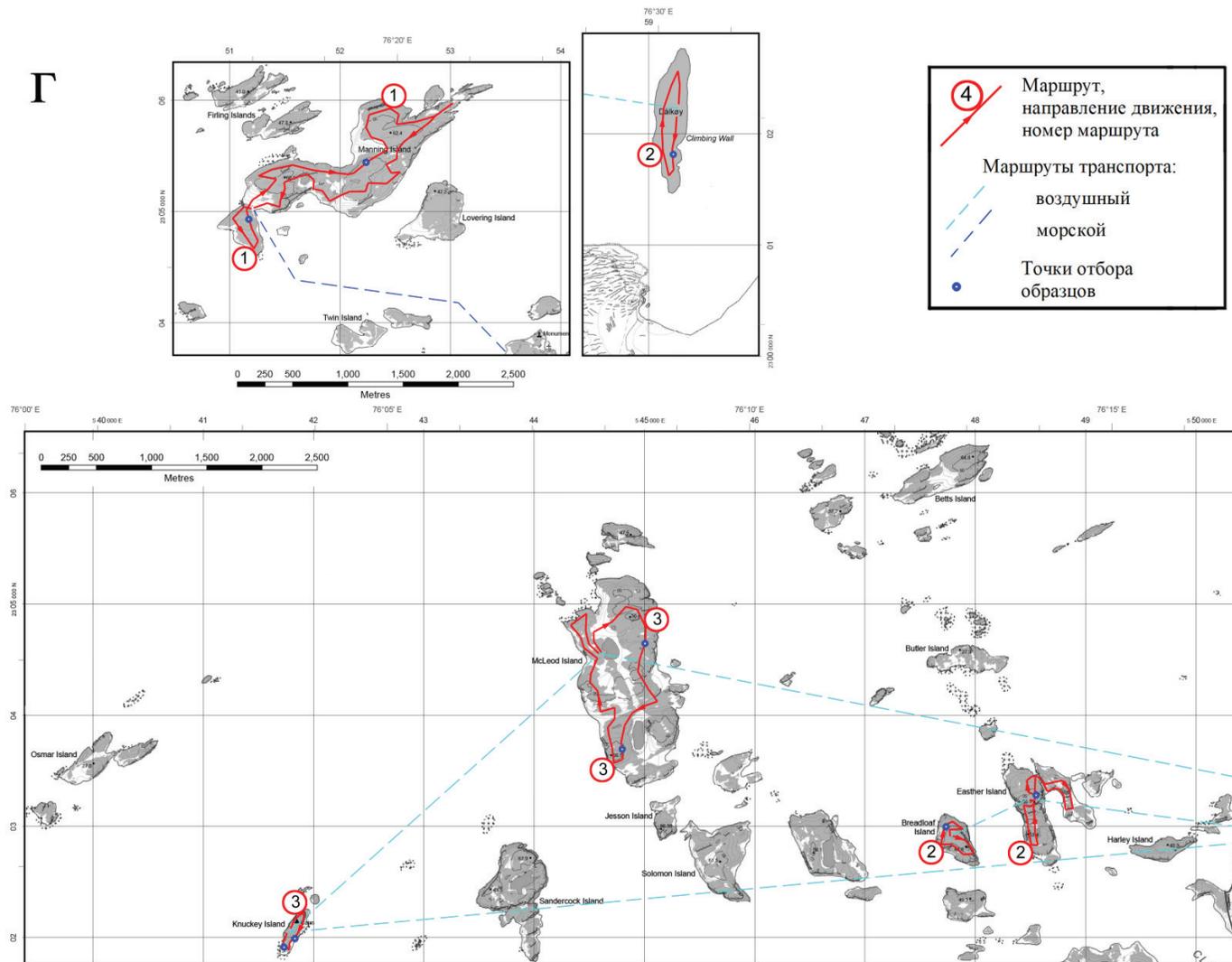


Рис. 10. Полевые маршруты: а — п-ов Стурнес; б — п-ов Брокнес; в — п-ов Гровнес; г — острова. Основа — карта [Larsemann Hills, 2005], проекция UTM, зона 43S. Нумерация маршрутов дана хронологически, отдельно для каждого из 4-х основных районов

Fig. 10. Field routes: a — Stornes Peninsula; b — Broknes Peninsula; c — Grovnes Peninsula; d — Islands. The background is the map [Larsemann Hills, 2005], UTM projection, 43S zone. Route numbering is chronological, separately for each of the four major regions

Табл. 1. Характеристика пеших маршрутов геоморфометрического дешифрирования (рис. 10)
Table 1. Characteristics of foot routes of geomorphometric interpretation (fig. 10)

№	Дата	Район маршрута	Способ заброски и вывоза с маршрута	Длина, км	Горные породы*
<i>П-ов Стурнес и прилегающие территории (рис. 10а):</i>					
1	06.01	Холмы вдоль западного берега фьорда Тала, от балка Витязь до п-ова Донован	Пешком по припаю с/на НЭС «Академик Федоров»	7,59	<i>bgo, tdq, sp</i>
2	07.01	Пик Гнейс, холм Уайт, пик Турмалин и прилегающие территории	"	7,60	<i>bgo, sg, sp, whg, lfp</i>
3	08.01	Холмы между оз. Бургесс и Фрозен, пиком Турмалин и бухтой Блейр	"	8,75	<i>bgo, sp, tq, tdq, whg, sg</i>
4	09.01	Холмы между пиком Бланделл, оз. Тасси и Спейт	"	8,14	<i>bgo, tq, sg</i>
5	10.01	Северная часть п-ова Тонах и п-ов Придди	Вертолет Ка-32С с/на НЭС «Академик Федоров»	6,50	<i>gp, bpg</i>
6	30.01	Холмы на северо-востоке бухты Уилкок	Квадроцикл Stels Leopard и снегоход Bombardier Ski-Doo со/на ст. Прогресс	4,01	<i>epg, qfg, bqf, wbp, ttq</i>
7	31.01	Скальные массивы мысов Маккарти, Браун и безымянного	"	6,93	<i>pg, sp, bpg</i>
8	01.02	Три массива холмов вдоль юго-западного побережья фьорда Тала	"	6,54	<i>bqf, bpg, bgo</i>
9	07.02	Район между фьордом Джонстон, оз. Феррис, и пиками Гнейс и Турмалин	Вертолет Ка-32С со/на ст. Прогресс	4,13	<i>bgo, lfp, gp</i>
10	08.02	Безымянный п-ов между фьордом Джонстон, холмом Тамблдаун и бухтой Барри Джонс	"	7,42	<i>bgo, jgo, qfg, lfp, sp, sg, lpg, tq</i>
11	11.02	Район между оз. Феррис, бухтой Блэйр и пиком Турмалин	"	5,37	<i>gp, bgo, whg, sg</i>
12	12.02	П-ов Донован	"	3,09	<i>bgo, jgo</i>
13	15.02	Мыс МакКарти, остров Ванда и мыс Флоринского [Флоринский, 2023] (три сегмента)	То же (и между сегментами)	5,24	<i>pg, sp, gp, bpg</i>
14	16.03	Массивы холмов на северо-восточном и восточном побережье бухты Уилкок (три сегмента)	Ратрак Kässbohrer PistenBully Polar 300 со/на ст. Прогресс (и между сегментами)	5,21	<i>bgq, qfg, sg, wbp, ttq, bpg, sp</i>
15	20.03	Район холма Тамблдаун	"	7,21	<i>bgo, tdq</i>

№	Дата	Район маршрута	Способ заброски и вывоза с маршрута	Длина, км	Горные породы *
16	22.03	Два сегмента: массивы холмов на северном и северо-восточном побережье бухты Уилкок	"	2,84	<i>bpg, qfg, tdq</i>
17	30.03	Холмы южной части п-ова Тонах	"	7,88	<i>bpg, gp</i>
18	31.03	Запад п-ова Тонах и скалы севере бухты Уилкок	"	10,99	<i>gp, bpg</i>
19	06.04	Район оз. Фрозен	"	5,42	<i>bgo, sp, whg, tq, lfp, tdq</i>
<i>П-ов Брокнес и прилегающие территории (рис. 10б):</i>					
1	13.01	Район оз. Рейд и базы Лоу	—	6,34	<i>bpg, lfp</i>
2	14.01	Район бухты Тюленьей и хребта Бейз	—	5,89	<i>lfp, bpg</i>
3	15.01	Район между хребтом Бейз и бухтой Долкой	—	9,40	<i>bpg</i>
4	16.01	Район между хребтом Бейз и оз. Сибторп, Прогресс и Скандретт	—	9,29	<i>bpg, gp</i>
5	17.01	Холмы вдоль западного берега оз. Скандретт	—	8,27	<i>bpg, gp</i>
6	22.01	Район между оз. Дискашн и утесом Соренсен	—	8,01	<i>bpg, whg, lfp</i>
7	23.01	Холмистый район к югу от холма Кантербери	—	11,95	<i>bpg, gp</i>
8	27.01	П-ов Стинеар	—	14,54	<i>bpg, lfp</i>
9	28.01	Нунатаки между оз. Камерон и аэродромом	—	12,23	<i>bpg, gp</i>
10	29.01	Холмистый район вокруг оз. Камерон	—	11,26	<i>bpg, gp</i>
11	04.02	Район между ст. Прогресс I и базой Лоу	—	7,54	<i>bpg</i>
12	06.02	Горный массив Стена	Вездеход ГАЗ-34039 со ст. Прогресс; квадроцикл Stels Leopard на ст. Прогресс	3,24	<i>bpg</i>
13	10.02	Нунатаки вокруг оз. Боулдер	Квадроцикл Stels Leopard и снегоход Bombardier Ski-Doo со ст. Прогресс; вездеход ГАЗ-34039 на ст. Прогресс	4,98	<i>bpg</i>
14	13.02	Зона провала 2017 г. на леднике Долк, каньон между ст. Прогресс I и бухтой Долкой, холмы к востоку от оз. Сибторп	Квадроцикл Stels Leopard со/на ст. Прогресс	8,24	<i>bpg</i>
15	14.02	П-ов Миррор	—	8,25	<i>pg, lfp, pmd, bpg, nmg, zsg</i>
16	20.02	Район холма Кантербери	—	11,47	<i>gp, bpg</i>

№	Дата	Район маршрута	Способ заброски и вывоза с маршрута	Длина, км	Горные породы*
17	21.02	Район хребта Расти, утеса Кастрл и межгорной долины к северу от них	—	12,23	<i>bpg, gp</i>
18	02.03	Холмы к востоку и цепочка холмов к северу от пика Гентнер	—	10,86	<i>bpg, whg</i>
19	04.03	Пик Гентнер и холмы вдоль фьорда Клеменс до п-ова Лайд	—	14,15	<i>bpg, gp</i>
20	07.03	Район пиков Три Мен, Бессо и безымянный холмистый массив к юго-востоку от них	—	14,63	<i>bpg, whg, lfp</i>
21	12.03	Холмы к востоку от пиков Три Мен и Бессо	—	12,54	<i>bpg</i>
22	05.04	Нунатаки между оз. Боулдер и горным массивом Стена	Ратрак Kässbohrer PistenBully Polar 300 со/на ст. Прогресс	2,33	<i>bpg</i>
23	09.04	П-ов Лайд	—	15,74	<i>bpg, gp, whg, pmd</i>
24	20.04	Северо-восточное побережье западного Брокнеса	Вездеход Argo Avenger 800 через фьорд Нелла (туда)	8,25	<i>bpg, gp</i>
25	21.04	П-ов Лайд	—	11,33	<i>bpg, gp, lfp, whg</i>
<i>П-ова Гровнес и прилегающие территории (рис. 10в):</i>					
1	18.01	П-ов Гровнес	Вездеход ГАЗ-34039 со/на ст. Прогресс	6,35	<i>bgo, gt, bpg</i>
2	20.01	Восточная часть о. Фишер	Вездеход Argo Avenger 800 со/на ст. Прогресс	5,31	<i>gp, lfp, sp, bpg, pmd</i>
3	21.01	Западная часть п-ова Бхарати	Квадроцикл Stels Leopard и снегоход Bombardier Ski-Doo со/на ст. Прогресс	7,49	<i>bgo, bpg, sp, lfp</i>
4	24.01	П-ов Браттневет	"	6,64	<i>bgo, bpg, sp, lfp</i>
5	03.02	Восточная часть п-ова Бхарати	"	5,82	<i>bgo, gt, bpg</i>
6	18.02	Западная часть о. Фишер	Вертолет Ка-32С со/на ст. Прогресс	6,75	<i>bgo, lfp, sp, bpg</i>
7	06.03	Нунатаки к юго-востоку от южной оконечности фьорда Тала	Ратрак Kässbohrer PistenBully Polar 300 со/на ст. Прогресс	2,33	<i>gp</i>
<i>Острова (рис. 10г):</i>					
1	25.01	О. Мэннинг	Вездеход Argo Avenger 800 со/на ст. Прогресс	6,82	<i>so, gp, pg</i>
2	16.02	О-ва Долкой, Истер и Бредлоф	Вертолет Ка-32С со/на ст. Прогресс и между островами	5,34	<i>dg, bpg, epg, sp, jgo, lfp</i>
3	17.02	О-ва МакЛеод и Кнаки	"	5,19	<i>so, gp, pg</i>

* Краткое описание горных пород, преобладающих вдоль маршрутов [*Carson, Grew, 2007*]:

- bgo*: мезопротерозойский кремовый, гранатсодержащий кислый ортогнейс Бланделл;
bpg: неопротерозойский гранатсодержащий кварц-полевошпатовый парагнейс Брокнес с силлиманитом, шпинелью и магнетитом;
bqf: неопротерозойский биотитовый кварц-полевошпатовый парагнейс пика Бангера;
dg: кембрийский среднезернистый биотитовый серый гранит Долкой с магнетитом, апатитом, монацитом и цирконом;
epg: неопротерозойский биотит-плагиоклазовый серый гнейс острова Истер с крупными порфиробластами граната и кордиерита;
gp: неопротерозойский кварц-полевошпатовый метасаммит Гентнер с гранатом и биотитом;
gt: мезопротерозойский (~990 млн лет) среднезернистый ортопироксеновый гранат- и биотитсодержащий ортогнейс Гровнес;
jgo: мезопротерозойский лейкократовый светло-серый кислый гранат-, кордиерит- и биотитсодержащий ортогнейс Джонстон;
lfp: неопротерозойский темногранатовый, силлиманитовый и биотитовый метапелит озера Феррис со шпинелью и магнетитом;
lpg: неопротерозойский лейкократовый призматин- и турмалинсодержащий кварцевый гнейс Донован;
nmg: мезопротерозойский (~1100 млн лет) ортопироксен-клинопироксен-плагиоклазовый основной гранулит Нелла;
pg: кембрийский (~515 млн лет) биотитовый оранжевый гранит Прогресс с гранатом, магнетитом, шпинелью и цирконом;
pmd: кембрийская мелко- и среднезернистая биотитовая сиеногранитная дайка Прогресс с апатитом, цирконом и силлиманитом;
qfg: неопротерозойский биотитовый кварц-полевошпатовый гнейс Эллисон с силлиманитом и кордиеритом;
sg: неопротерозойский биотит-плагиоклазовый гнейс Стурнес со слоями призматина (В-корнерупина), кордиерита и биотита;
so: мезопротерозойский (~1125 млн лет) желтовато-коричневый кварц-плагиоклазовый кислый ортогнейс Сострен;
sp: неопротерозойский метапелит Стюве с преобладанием силлиманита и кордиерита;
tdq: неопротерозойский ржаво-красный метакварцит Тамблдаун-Хилл с малахитовыми пятнами на поверхности;
ttq: неопротерозойский темный зернистый турмалиновый метакварцит Тала;
tq: неопротерозойский голубой среднезернистый метакварцит Тасси Тарн;
wbp: неопротерозойский кварц-полевошпатовый гнейс Уилкок со слоями силлиманита и грандидиерита и сгустками призматина;
whg: неопротерозойский светло-серый лейкократовый гнейс Уайт-Хилл с биотитом, кварцем и плагиоклазом;
zsg: мезопротерозойский (~940 млн лет) лейкократовый кварц-полевошпатовый гнейс Зонгсан.

В сезон 68 РАЭ автор не смог провести полевое геоморфометрическое дешифрирование нескольких островов среднего размера (о-ва Осмар, Кук, Ричардсон, Хилл, Сандеркок, Соломон, Беттс, Батлер, Фирлинг и Лаверинг) (рис. 10г). В будущем их полевое обследование может быть осуществлено путем заброски на острова либо на вертолете в периоды стоянки и разгрузки научно-экспедиционных судов (НЭС) во фьорде Тала, либо на вездеходе-амфибии со станции Прогресс в период устойчивого припая (конец весны — начало лета). Учитывая шаг сетки ЦМР (8 м), автор не рассматривает десятки мелких островов как объекты геоморфометрического дешифрирования.

Представленные результаты продолжают исследования автора на территориях холмов Тала (оазис Молодежный) и полуострова Файлдс (о. Кинг-Джордж, Южные Шетландские острова), которые проводились в сезон 67 РАЭ [Флоринский, 2022]. Работы ведутся в рамках многолетнего проекта по геоморфометрическому моделированию оазисов и других свободных от оледенения территорий Антарктики [Florinsky, 2023]. Конечная цель проекта — создание геоморфометрического атласа свободных от оледенения территорий, в пределах которых:

- а) расположены отечественные круглогодичные станции и сезонные базы;
- б) в прежние годы отечественными учеными проводились исследования.

Помимо холмов Ларсеманн, Тала (оазисы Молодежный и Вечерний) и п-ова Файлдс, в атласе должны быть представлены оазисы Ширмахера, Бангера, Беркс, нунатаки Холладей, о. Хасуэлл, холмы Файф, оазисы Терешковой, Полканова, Коновалова, Обручева, Джетти и Унтерзее, геоморфометрическое изучение которых планируется провести в следующие сезоны РАЭ.

ВЫВОДЫ

В рамках 68 РАЭ впервые проведено геоморфометрическое моделирование и картографирование территории холмов Ларсеманн — одного из наиболее популярных у исследователей и важных с логистической точки зрения антарктических оазисов. В ходе работ по ЦМР REMA рассчитаны цифровые модели и карты 17 морфометрических величин, включая 12 кривизн, входящих в полную систему кривизн.

Впервые проведены работы по полевому геоморфометрическому дешифрированию рассчитанных морфометрических карт. Для этого в пределах холмов Ларсеманн было пройдено 54 пеших маршрута общей длиной около 422 км, в ходе которых производился сравнительный анализ элементов реального рельефа местности и их отображение на морфометрических картах, а также было отобрано 150 образцов горных пород.

Геоморфометрическое моделирование, картографирование и полевое дешифрирование антарктических оазисов ранее не проводилось. Описанные в статье работы и полученные результаты имеют мировую научную новизну и закрепляют российский приоритет в данном направлении исследований.

Работы ведутся в рамках многолетнего проекта по геоморфометрическому моделированию оазисов и других свободных от оледенения территорий Антарктики, конечной целью которого является создание их геоморфометрического атласа. Особенностью разрабатываемого атласа должно стать включение в его состав созданных фотограмметрическим способом цифровых 3D моделей геологических образцов, отобранных при прохождении полевых маршрутов.

Рассчитанные морфометрические карты могут быть полезны для геологических, геоморфологических, почвенных, биологических, климатических, гидрологических и гляциологических исследований оазиса холмы Ларсеманн.

БЛАГОДАРНОСТИ

Автор признателен А.В. Клепикову и В.Л. Мартьянову (РАЭ) за предоставленную возможность участвовать в сезонных работах на территории оазиса холмы Ларсеманн в рамках 68 РАЭ. Постоянную поддержку автору оказывали А.Н. Николаев (68 РАЭ), Д.А. Мамадалиев (67 РАЭ) и Д.В. Шепелёв (68 РАЭ). Логистическую и техническую помощь оказали И.А. Абдрахманов (ВНИИОкеангеология), И.В. Ногайцев (68 РАЭ), А.Ю. Квашин (67 РАЭ), А.А. Краснов, В.Н. Остроумов, А.Ф. Сажин, И.В. Левченко, А.Ю. Кочетков и Д.В. Тарасов (68 РАЭ). Особая благодарность Т.Н. Скрыпицыной (МИИГАиК), Т.Ю. Петровой (ИМПБ РАН), М.В. Грибок (МГУ) и А.Ю. Пшеничному (68 РАЭ) за моральную поддержку.

ACKNOWLEDGEMENTS

The author is grateful to A.V. Klepikov and V.L. Martyanov (Russian Antarctic Expedition) for the possibility to participate in the seasonal works in the Larsemann Hills oasis within the frames of the 68th RAE. Constant support were provided by A.N. Nikolaev (68th RAE), D.A. Mamadaliev (67th RAE), and D.V. Shepelev (68th RAE). Logistical and technical assistance was provided by I.A. Abdrakhmanov (VNIIOkeangeologia), I.V. Nogaitsev (68th RAE), A.Yu. Kvashin (67th RAE), A.A. Krasnov, V.N. Ostroumov, A.F. Sazhin, I.V. Levchenko, A.Yu. Kochetkov, and D.V. Tarasov (68th RAE). Special thanks to T.N. Skrypitsyna (Moscow State University of Geodesy and Cartography), T.Yu. Petrova (Institute of Mathematical Problems of Biology, Russian Academy of Sciences), M.V. Gribok (Lomonosov Moscow State University), and A.Yu. Pshenichnyj (68th RAE) for moral support.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Большаинов Д.Ю.* Геоморфологическое строение холмов Ларсеманн. Антарктика. Геоморфологический атлас. СПб.: Карта, 2011. С. 222–225.
- Боронина А.С.* Крупные прорывы озер антарктических оазисов: обобщение современных знаний. Лед и снег, 2022. Т. 62. № 1. С. 141–160. DOI: 10.31857/S2076673422010122.
- Дрыга Д.О.* К методике создания трехмерных моделей объектов культурного наследия экспонатов музейных коллекций. Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка, 2019. Т. 63. № 5. С. 512–523. DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-5-512-523.
- Мергелов Н.С.* Почвы влажных долин в оазисах Ларсеманн и Вестфолль (Земля Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида). Почвоведение, 2014. № 9. С. 1027–1045. DOI: 10.7868/S0032180X14090093.
- План управления Особо охраняемым районом Антарктики (ООРА) № 174 «Стурнес» (Холмы Ларсеманн, Земля Принцессы Елизаветы). Заключительный отчет XXXVII Консультативного совещания по Договору об Антарктике, Мера 12, Приложение. Буэнос-Айрес: Секретариат Договора об Антарктике, 2014. 16 с.
- План управления Особо управляемым районом Антарктики № 6 «Холмы Ларсеманн» (Восточная Антарктика). Заключительный отчет XLIII Консультативного совещания по Договору об Антарктике, Мера 1. Буэнос-Айрес: Секретариат Договора об Антарктике, 2021. 41 с.
- Симонов И.А.* Оазисы Восточной Антарктиды. Л.: Гидрометеиздат, 1971. 176 с.
- Сократова И.Н.* Антарктические оазисы: история и результаты исследований. СПб.: ААНИИ, 2010. 274 с.
- Флоринский И.В.* Геоморфометрия сегодня. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Международной конференции.

М.: Географический факультет МГУ, 2021. Т. 27. Ч. 2. С. 394–448. DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-394-448.

Флоринский И.В. Беспилотная аэрофотосъемка в летний сезон 67-й Российской антарктической экспедиции. ИнтерКарто. ИнтерГИС. Геоинформационное обеспечение устойчивого развития территорий: Материалы Международной конференции. М.: Географический факультет МГУ, 2022. Т. 28. Ч. 1. С. 284–304. DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-284-304.

Флоринский И.В. О присвоении новых географических названий в оазисе холмы Ларсеманн (Восточная Антарктида). Геодезия и картография, 2023. № 4. С. 60–64. DOI: 10.22389/0016-7126-2023-994-4-60-64.

Burgess J.S., Spate A.P., Shevlin J. The onset of deglaciation in the Larsemann Hills, Eastern Antarctica. *Antarctic Science*, 1994. V. 6. No. 4. P. 491–495. DOI: 10.1017/S095410209400074X.

Carson C.J., Grew E.S. Geology of the Larsemann Hills, Princess Elizabeth Land, Antarctica. 1: 25 000 scale Map. Canberra: Geoscience Australia, 2007. 1 p.

Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Boehner J. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4. Geoscientific Model Development, 2015. V. 8. P. 1991–2007. DOI: 10.5194/gmd-8-1991-2015.

Evans I.S. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. *Spatial Analysis in Geomorphology*. London: Methuen, 1972. P. 17–90. DOI: 10.4324/9780429273346-2.

Florinsky I.V. Digital terrain analysis in soil science and geology. 2nd ed. Amsterdam: Academic Press, 2016. 486 p.

Florinsky I.V. An illustrated introduction to general geomorphometry. *Progress in Physical Geography*, 2017. V. 41. No. 6. P. 723–752. DOI: 10.1177/0309133317733667.

Florinsky I.V. Geomorphometric modeling and mapping of Antarctic oases. *ArXiv Preprints*, 2023. No. 2305.07523. 84 p. DOI: 10.48550/arXiv.2305.07523.

Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Amsterdam: Elsevier, 2009. 765 p.

Gupta P. Biodiversity of Larsemann Hills, Antarctica. *Climate Change*, 2015. V. 1. No. 3. P. 174–183.

Howat I.M., Porter C., Smith B.E., Noh M.-J., Morin P. The Reference Elevation Model of Antarctica. *Cryosphere*, 2019. V. 13. No. 2. P. 665–674. DOI: 10.5194/tc-13-665-2019.

Kiernan K., Gore D.B., Fink D., White D.A., McConnell A., Sigurdsson I.A. Deglaciation and weathering of Larsemann Hills, East Antarctica. *Antarctic Science*, 2009. V. 21. No. 4. P. 373–382. DOI: 10.1017/S0954102009002028.

Larsemann Hills, Princess Elizabeth Land, Antarctica. *Environmental Management Map*, 1: 25 000 scale. Kingston: Australian Antarctic Division, 2005. 1 p.

Shary P.A. Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures. *Mathematical Geology*, 1995. V. 27. No. 3. P. 373–390. DOI: 10.1007/BF02084608.

Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma*, 2002. V. 107. Iss. 1–2. P. 1–32. DOI: 10.1016/S0016-7061(01)00136-7.

Stüwe K., Braun H.-M., Peer H. Geology and structure of the Larsemann Hills area, Prydz Bay, East Antarctica. *Australian Journal of Earth Sciences*, 1989. V. 36. P. 219–241. DOI: 10.1080/08120098908729483.

Terrain Analysis: Principles and Applications. New York: Wiley, 2000. 479 p.

Wilson J.P. Environmental applications of digital terrain modeling. Chichester: Wiley-Blackwell, 2018. 360 p.

REFERENCES

Bolshiyarov D.Yu. Geomorphic structure of the Larsemann Hills. Antarctica. Geomorphological Atlas. St. Petersburg: Karta, 2011. P. 222–225 (in Russian).

Boronina A.S. Large-scale outbursts of lakes in the Antarctic oases: current knowledge. Ice and Snow, 2022. V. 62. No. 1. P. 141–160 (in Russian). DOI: 10.31857/S2076673422010122.

Burgess J.S., Spate A.P., Shevlin J. The onset of deglaciation in the Larsemann Hills, Eastern Antarctica. Antarctic Science, 1994. V. 6. No. 4. P. 491–495. DOI: 10.1017/S095410209400074X.

Carson C.J., Grew E.S. Geology of the Larsemann Hills, Princess Elizabeth Land, Antarctica. 1: 25 000 scale Map. Canberra: Geoscience Australia, 2007. 1 p.

Conrad O., Bechtel B., Bock M., Dietrich H., Fischer E., Gerlitz L., Wehberg J., Wichmann V., Boehner J. System for automated geoscientific analyses (SAGA) v. 2.1.4. Geoscientific Model Development, 2015. V. 8. P. 1991–2007. DOI: 10.5194/gmd-8-1991-2015.

Dryga D.O. The technique of creating three-dimensional models of cultural heritage exhibits of museum collections. Izvestia Vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying, 2019. V. 63. No. 5. P. 512–523 (in Russian). DOI: 10.30533/0536-101X-2019-63-5-512-523.

Evans I.S. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. Spatial Analysis in Geomorphology. London: Methuen, 1972. P. 17–90. DOI: 10.4324/9780429273346-2.

Florinsky I.V. Geomorphometry today. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2021. V. 27. Part 2. P. 394–448 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2021-2-27-394-448.

Florinsky I.V. Unmanned aerial survey in the summer season of the 67th Russian Antarctic Expedition. InterCarto. InterGIS. GI support of sustainable development of territories: Proceedings of the International conference. Moscow: MSU, Faculty of Geography, 2022. V. 28. Part 1. P. 284–304 (in Russian). DOI: 10.35595/2414-9179-2022-1-28-284-304.

Florinsky I.V. On the assignment of new geographic names in the Larsemann Hills oasis (East Antarctica). Geodesy and Cartography, 2023. No. 4. P. 60–64 (in Russian). DOI: 10.22389/0016-7126-2023-994-4-60-64.

Florinsky I.V. Digital terrain analysis in soil science and geology. 2nd ed. Amsterdam: Academic Press, 2016. 486 p.

Florinsky I.V. An illustrated introduction to general geomorphometry. Progress in Physical Geography, 2017. V. 41. No. 6. P. 723–752. DOI: 10.1177/0309133317733667.

Florinsky I.V. Geomorphometric modeling and mapping of Antarctic oases. ArXiv Preprints, 2023. No. 2305.07523. 84 p. DOI: 10.48550/arXiv.2305.07523.

Geomorphometry: Concepts, Software, Applications. Amsterdam: Elsevier, 2009. 765 p.

Gupta P. Biodiversity of Larsemann Hills, Antarctica. Climate Change, 2015. V. 1. No. 3. P. 174–183.

Howat I.M., Porter C., Smith B.E., Noh M.-J., Morin P. The Reference Elevation Model of Antarctica. Cryosphere, 2019. V. 13. No. 2. P. 665–674. DOI: 10.5194/tc-13-665-2019.

Kiernan K., Gore D.B., Fink D., White D.A., McConnell A., Sigurdsson I.A. Deglaciation and weathering of Larsemann Hills, East Antarctica. *Antarctic Science*, 2009. V. 21. No. 4. P. 373–382. DOI: 10.1017/S0954102009002028.

Larsemann Hills, East Antarctica Antarctic Specially Managed Area No. 6 Management Plan. Antarctic Treaty Consultative Meeting (ATCM) XLIII Final Report. Measure 1. Buenos Aires: Secretariat of the Antarctic Treaty, 2021. 35 p.

Larsemann Hills, Princess Elizabeth Land, Antarctica. Environmental Management Map, 1: 25 000 scale. Kingston: Australian Antarctic Division, 2005. 1 p.

Management plan for Antarctic Specially Protected Area No. 174 Stornes, Larsemann Hills, Princess Elizabeth Land. Antarctic Treaty Consultative Meeting (ATCM) XXXVII Final Report, Measure 12 Annex. Buenos Aires: Secretariat of the Antarctic Treaty, 2014. 13 p.

Mergelov N.S. Soils of wet valleys in the Larsemann Hills and Vestfold Hills Oases (Princess Elizabeth Land, East Antarctica). *Eurasian Soil Science*, 2014. V. 47. No. 9. P. 845–862. DOI: 10.1134/S1064229314090099.

Shary P.A. Land surface in gravity points classification by a complete system of curvatures. *Mathematical Geology*, 1995. V. 27. No. 3. P. 373–390. DOI: 10.1007/BF02084608.

Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma*, 2002. V. 107. No. 1–2. P. 1–32. DOI: 10.1016/S0016-7061(01)00136-7.

Simonov I.A. Oases of East Antarctica. Leningrad: Hydrometeoizdat, 1971. 176 p. (in Russian).

Sokratova I.N. Antarctic Oases: History and Research Results. St. Petersburg: AARI, 2010. 274 p. (in Russian).

Stüwe K., Braun H.-M., Peer H. Geology and structure of the Larsemann Hills area, Prydz Bay, East Antarctica. *Australian Journal of Earth Sciences*, 1989. V. 36. P. 219–241. DOI: 10.1080/08120098908729483.

Terrain Analysis: Principles and Applications. New York: Wiley, 2000. 479 p.

Wilson J.P. Environmental applications of Digital Terrain Modeling. Chichester: Wiley-Blackwell, 2018. 360 p.