

СОВРЕМЕННАЯ КОЛИЧЕСТВЕННАЯ И ПРОЦЕССНАЯ ГЕОМОРФОЛОГИЯ

УДК 51-7+528.94+551.4+912.44

ГЕОМОРФОМЕТРИЯ ПЕРИГЛЯЦИАЛЬНЫХ ТЕРРИТОРИЙ АНТАРКТИКИ

© 2025 г. И. В. Флоринский*

*Институт математических проблем биологии РАН — филиал ФИЦ “Институт прикладной математики
им. М.В. Келдыша РАН”, Пущино, Московская область, Россия*

**e-mail: iflor@mail.ru*

Поступила в редакцию 19.06.2025 г.

После доработки 27.07.2025 г.

Принята к публикации 25.09.2025 г.

В современной науке строгость и воспроизводимость исследований рельефа обеспечивает геоморфометрия — дисциплина, сформировавшаяся на стыке фотограмметрии, геоинформатики и вычислительной математики, обладающая развитой физико-математической теорией и мощным вычислительным аппаратом. Методы геоморфометрии применяются для решения широкого круга разномасштабных задач наук о Земле. Геоморфометрическое моделирование перигляциальных территорий Антарктики — оазисов, свободных от оледенения островов, горных массивов и нунатаков — актуально для получения новых знаний о количественных характеристиках рельефа этих уникальных объектов и дальнейшего использования морфометрической информации. В статье рассмотрены три типичные перигляциальные антарктические территории: оазис мыса Бёркс (Земля Мэри Бэрд), остров Хасуэлл (Земля Королевы Мэри) и нунатак Ленинградский (Земля Оутса). Впервые проведено геоморфометрическое моделирование и картографирование этих территорий. В качестве исходных данных нами использованы три фрагмента цифровой модели рельефа (ЦМР) Reference Elevation Model of Antarctica (REMA) с шагом сетки 2 и 8 м. По трем ЦМР нами рассчитаны цифровые модели и представлены серии карт десяти наиболее значимых в фундаментальном и прикладном отношении морфометрических величин. К ним относятся: крутизна склона, экспозиция склона, горизонтальная кривизна, вертикальная кривизна, минимальная кривизна, максимальная кривизна, индекс ветрового воздействия, водосборная площадь, топографический индекс влажности и индекс мощности потоков. Даны интерпретации полученных карт, обсуждается их возможное использование. Работа проведена в рамках проекта по созданию физико-географического тематического научно-справочного геоморфометрического атласа свободных от оледенения территорий Антарктики.

Ключевые слова: рельеф, цифровое моделирование рельефа, геоморфометрическое картографирование, Антарктика, антарктический оазис, нунатак

DOI: 10.7868/S2658697525060023

ВВЕДЕНИЕ

На современном этапе строгость и воспроизводимость исследований рельефа обеспечивает геоморфометрия — научная дисциплина, сформировавшаяся на стыке фотограмметрии, геоинформатики и вычислительной математики, обладающая развитой физико-математической теорией и мощным аппаратом вычислительных методов. Предметом геоморфометрии является математическое моделирование и количественный анализ рельефа, а также взаимосвязей между рельефом и другими компонентами геосистем

(Evans, 1972; Florinsky, 2025; Geomorphometry ..., 2009; Minár et al., 2024; Moore et al., 1991; Shary et al., 2002; Terrain ..., 2000). Методы геоморфометрии широко применяются для решения различных разномасштабных задач геоморфологии, гидрологии, почвоведения, геологии, гляциологии, спелеологии, геоботаники, зоогеографии, океанологии, планетологии, урбанистики, археологии и других наук. Подробную актуальную информацию об этом можно найти в обзорах последнего десятилетия (Флоринский, 2021; Харченко, 2020; Wilson, 2018; Xiong et al., 2022).

Перспективным направлением является геоморфометрическое картографирование перигляциальных ландшафтов Антарктики, которые можно разделить на три основных типа (Короткевич, 1972; Марков и др., 1968; Симонов, 1971; Сократова, 2010):

1. Антарктические оазисы — свободные от оледенения прибрежные, шельфовые и горные области. Прибрежные оазисы расположены между материковым ледниковым щитом и океаном; шельфовые оазисы — между материковым ледниковым щитом и шельфовыми ледниками; горные оазисы находятся во внутригорных долинах и впадинах.

2. Свободные от оледенения острова, расположенные за пределами шельфовых ледников.

3. Свободные от оледенения горные хребты и нунатаки.

Для оазисов, свободных от оледенения горных хребтов и нунатаков характерен местный климат холодной пустыни. Причем, если климат хребтов и нунатаков полностью контролируется окружающим ледниковым покровом, то климатические особенности оазисов — предельно контрастных обособленных интразональных геокомплексов (Солопов, 1973) — определяются взаимовлиянием прилегающих ледников и каменистой поверхности оазисов (Солопов, 1971). Климат свободных от оледенения островов определяется взаимодействием близлежащего материкового ледникового покрова и окружающего океана (Симонов, 1975).

Особенностью оазисов и свободных от оледенения островов является наличие гидрографической сети — озер, а также временных летних и, реже, постоянных водотоков (Короткевич, 1972; Марков и др., 1968; Симонов, 1971, 1975).

Для всех трех основных типов перигляциальных ландшафтов Антарктики характерно наличие примитивных почв (Короткевич, 1972; The Soils ..., 2015) и низшей растительности, представленной водорослями, мхами и лишайниками (Короткевич, 1972; Ochuya et al., 2008; Øvstedal et al., 2001). Помимо почвенной фауны, отдельные виды которой встречаются даже на удаленных от побережья нунатаках, в пришельфовых и горных оазисах животный мир представлен преимущественно летующими морскими птицами, а в прибрежных оазисах и на островах — морскими птицами и ластоногими (Булавинцев, 1995; Короткевич, 1972; Симонов, 1975; Сыроечковский, 1966).

Для ряда свободных от оледенения районов Антарктики — холмов Ларсеманн, холмов Тала (оазисы Молодежный и Вечерний), оазиса Ширмахера, п-ова Файлдс и оазиса Бангера — ранее нами было выполнено геоморфометрическое

моделирование и картографирование (Флоринский, Жарнова, 2025; Florinsky, 2023a, b). Начаты работы по созданию физико-географического тематического научно-справочного геоморфометрического атласа всех перигляциальных территорий Антарктики (Флоринский, 2024). В основе этих работ лежит цифровое моделирование и картографирование основных фундаментальных морфометрических величин (табл. 1), которые связаны с физико-математической теорией топографической поверхности (Florinsky, 2025; Shary et al., 2002) и концепцией общей геоморфометрии. В рамках этой концепции проводится “измерение и анализ таких характеристик рельефа, которые применимы к любой поверхности. Общая геоморфометрия создает основу для количественного сравнения качественно различных ландшафтов” (Evans, 1972, p. 18). Каждая фундаментальная морфометрическая величина количественно описывает определенное свойство геометрии рельефа и обладает уникальной физико-математической и физико-географической интерпретацией; вместе с тем, эти морфометрические величины взаимно дополняют друг друга (Florinsky, 2025).

В данной статье представлены результаты геоморфометрического моделирования и картографирования трех типичных перигляциальных территорий Антарктики — оазиса м. Бёркс, о. Хасуэлл и нунатака Ленинградский (рис. 1).

ФИЗИКО-ГЕОГРАФИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ТЕРРИТОРИЙ

Оазис м. Бёркс

Оазис м. Бёркс (рис. 2а) расположен на Берегу Хобса (Земля Мэри Бэрд, Западная Антарктида; 74.75549° ю.ш., 136.81336° з.д.), на побережье безымянного окраинного моря Южного океана, лежащего между морями Амундсена и Росса. Территория оазиса включает в себя собственно м. Бёркс и расположенный на 1 км восточнее, отделенный ледником м. Роуз. Западная часть оазиса вытянута в субмеридианальном направлении на 4 км при ширине 1 км, а восточная — на 2 км. Оазис является северо-западной оконечностью покрытой льдом гряды Макдоналд и представляет собой скалистый пологий мелкосопочник со средними высотами 120–180 м над ур. м. Часть склонов террасированы ледниковыми процессами. В оазисе есть несколько небольших неглубоких озер, закрытых круглогодично или частично вскрывающихся в летний период. По долинам к морю спускаются небольшие ледниковые потоки (Абакумов и др., 2008; Лупачев, Абакумов, 2013).

Таблица 1. Определения и интерпретации ключевых морфометрических величин

Величина, ее обозначение и единица измерения	Определение и интерпретация
Крутизна, G (°)	Угол между горизонтальной и тангенциальной плоскостями в данной точке топографической поверхности. Определяет скорость потоков, перемещающихся вдоль поверхности под действием гравитации
Экспозиция, A (°)	Угол между направлением на север и горизонтальной проекцией вектора градиента, отсчитываемого по часовой стрелке от 0° до 360°, в данной точке топографической поверхности. Определяет направление потоков, перемещающихся вдоль поверхности под действием гравитации
Горизонтальная кривизна, k_h (м ⁻¹)	Кривизна нормального сечения, тангенциального горизонтали в данной точке топографической поверхности. Мера конвергенции потоков, перемещающихся вдоль поверхности под действием гравитации. Потоки конвергируют при $k_h < 0$ и дивергируют при $k_h > 0$. На картах k_h выделяются отроги хребтов и долин
Вертикальная кривизна, k_v (м ⁻¹)	Кривизна нормального сечения, имеющего общую касательную с линией скольжения в данной точке топографической поверхности. Мера относительного замедления потоков, перемещающихся вдоль поверхности под действием гравитации. Потоки замедляются при $k_v < 0$ и ускоряются при $k_v > 0$. На картах k_v выделяются уступы, террасы и т.п.
Минимальная кривизна, $k_{\min}$ (м ⁻¹)	Кривизна главного нормального сечения с минимальным изгибом в данной точке топографической поверхности. Значения $k_{\min} > 0$ выделяют локальные выпуклые элементы рельефа (например, холмы), а $k_{\min} < 0$ — вытянутые вогнутые формы (например, долины)
Максимальная кривизна, $k_{\max}$ (м ⁻¹)	Кривизна главного нормального сечения с максимальным изгибом в данной точке топографической поверхности. Значения $k_{\max} > 0$ выделяют вытянутые положительные формы (например, хребты), а $k_{\max} < 0$ — локальные впадины
Индекс ветрового воздействия, WEx	Мера средней подверженности склонов ветровым потокам всех возможных направлений в данной точке топографической поверхности
Водосборная площадь, CA (м ²)	Площадь замкнутой фигуры, сформированной отрезком горизонтали, который включает данную точку поверхности, и двумя линиями тока, приходящими с вышележащей точки на концы отрезка. Мера площади участков, которые могут дренироваться через данную точку топографической поверхности
Топографический индекс влажности, TWI	Логарифм отношения CA и G . Мера степени аккумуляции потоков в данной точке топографической поверхности
Индекс мощности потоков, SPI	Логарифм произведения CA и G . Мера потенциальной эрозионной силы поверхностных потоков в данной точке топографической поверхности

Составлено по: (Florinsky, 2025).

Оазис м. Бёркс сложен породами сеноманского интрузивного магматического комплекса, состоящего из лейкократовых и меланократовых габброидов (оливиновые или безоливиновые габбро и габбронориты), которые рассечены жильными и дайковыми телами среднего, кислого и основного состава, включая амфибол-биотитовые кварцевые микродиориты, кварцевые диорит-порфириды, микродиабазовые порфириды, габбро-долериты, долериты и др. (Ткачева и др., 2018).

Оазис характеризуется крайне суровыми погодными условиями, которые определяются, прежде всего, очень сильными ветрами

преимущественно восточного направления: среднегодовая скорость ветра 12.9 м/с при максимальной 61 м/с с порывами до 77 м/с, причем 136 дня в году скорость ветра превышает 30 м/с. Среднегодовая температура воздуха -12.4°C при абсолютных максимуме и минимуме $+7.4^{\circ}\text{C}$ и -46.4°C соответственно. В силу прибрежного положения и низких температур здесь отмечается высокая среднегодовая относительная влажность воздуха: 78.7%. Среднегодовое значение атмосферного давления составляет 981 мбар при абсолютных минимуме и максимуме 923 и 1019 мбар соответственно. Среднегодовое количество осадков составляет около 2000 мм

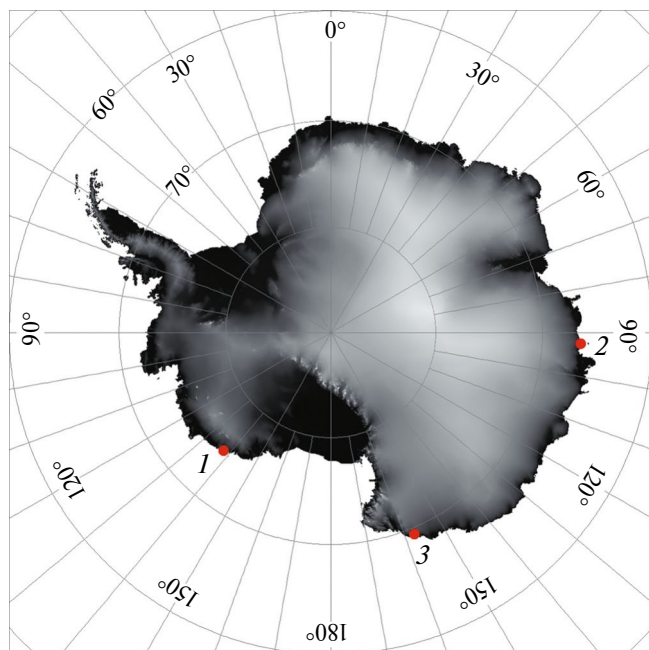


Рис. 1. Географическое положение трех типичных перигляциальных территорий Антарктики: 1 — оазис м. Бёркс; 2 — о. Хасуэлл; 3 — нунатак Ленинградский. В качестве основы использована ЦМР REMA с шагом сетки 1000 м.

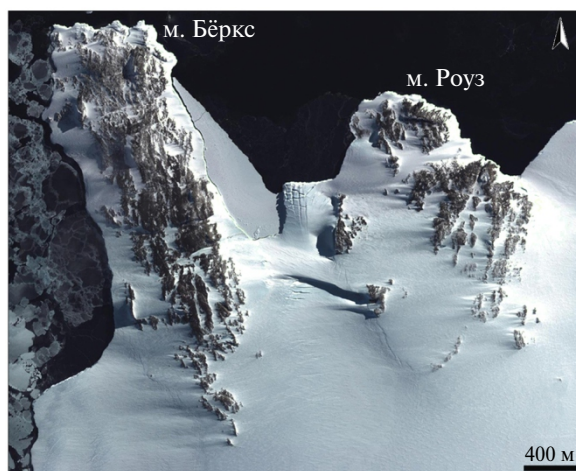
в виде снега (Абакумов и др., 2008; Лупачев, Абакумов, 2013; Lupachev et al., 2015).

В южной части оазиса расположена российская сезонная полярная база Русская, основанная в 1980 г. как круглогодичная полярная станция и законсервированная в 1990 г.

Остров Хасуэлл

Остров Хасуэлл (рис. 26) находится в заливе Трёшникова моря Дейвиса Южного океана, в 2.5 км к северу от м. Мабус (Берег Правды, Земля Королевы Мэри, Восточная Антарктида; 66.52567° ю.ш., 92.99541° в.д.). Остров является самым крупным (площадь около 1 км²) и высоким (максимальная высота 93 м над ур. м.) среди островов одноименного архипелага. Рельеф острова представляет собой скалистый мелко-сopочник. Плановая конфигурация очертаний острова подчиняется трещинам отдельности, разбивающим на отдельные блоки коренные породы, слагающие остров. Из других рельефообразующих факторов важную роль играет десквамация и эоловое выветривание.

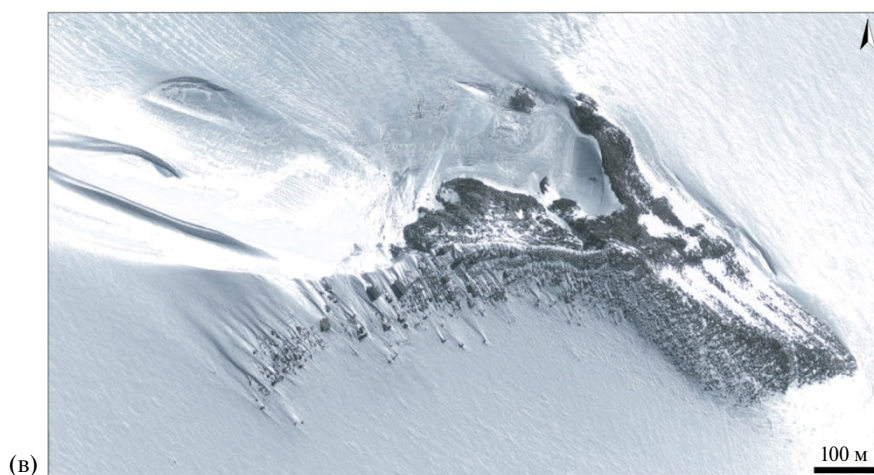
Остров сложен докембрийскими интрузивными чарнокитами, состоящими преимущественно



(а)



(б)



(в)

Рис. 2. Космоснимки: оазис м. Бёркс и прилегающий ледник (а); о. Хасуэлл (б); нунатак Ленинградский и прилегающий ледник (в) (мозаика снимков Google Maps).

из плагиоклаза, гиперстена, роговой обманки, кварца, биотита, магнетита и апатита. Чарнокиты рассеяны пластовыми и диагональными трещинами, выполненными аплитовидными и пегматитовыми жилами (Воронов, Климов, 1960).

На климат о. Хасуэлл оказывает влияние как близлежащий материковый ледниковый покров, так и окружающий океан. Здесь характерны частые и сильные ветры преимущественно юго-восточного направления (среднегодовая скорость ветра 6.4 м/с при максимальной 41 м/с, причем 220 дней в году сила ветра составляет более 15 м/с), а также отрицательная температура воздуха в течение почти всего года (среднегодовая температура воздуха -11°C при абсолютных максимуме и минимуме $+9^{\circ}\text{C}$ и -52°C соответственно). Среднегодовое количество осадков составляет около 810 мм, преимущественно в виде снега. Среднегодовая относительная влажность воздуха 74%. Среднегодовое значение атмосферного давления составляет 985 мбар при абсолютных минимуме и максимуме 919 и 1073 мбар соответственно (Фадеев, Мханна, 2021).

Остров Хасуэлл является Особо охраняемым районом Антарктики № 127 орнитологического профиля (План ..., 2022). Примерно в 3-х км к югу от острова, на нунатаках п-ва Мирный расположена российская круглогодичная полярная станция Мирный, основанная в 1956 г.

Нунатак Ленинградский

Нунатак Ленинградский (рис. 2в) расположен в восточной части Земли Отса (Восточная Антарктида; 69.50177° ю.ш., 159.3884° в.д.) в 2.7 км от береговой линии моря Сомова Южного океана. Он входит в группу нунатаков Халладей, которая возвышается над безымянным ледником восточнее выводного ледника Нолл и северо-западнее шельфового ледника Джиллетт. Нунатак Ленинградский представляет собой простирающийся в широтном направлении скальный гребень длиной около 1000 м, шириной от 100 до 150 м, высотой около 300 м над ур. м. и 100–200 м над окружающим ледниковым покровом. Поверхность нунатака бугристая и осложнена крупноглыбовыми развалами. Северный склон нунатака является обрывом высотой 150–180 м, а южный склон уступами уходит под снежник и ледник. Нунатак сложен чередующимися прослоями лейкократовых гранитов и серых биотитовых гнейсов (Орлов, 1973).

Нунатак Ленинградский расположен в зоне морского антарктического климата, характеризующегося очень быстрой и резкой сменой погодных условий. Относительная влажность меняется в течение года от 20 до 100% при средней 74%. Для атмосферного давления

отмечены существенные колебания в течение месяца: от 910 до 1018 мбар при среднегодовом значении 950 мбар. Среднегодовая температура -15°C , при абсолютных максимуме и минимуме $+5^{\circ}\text{C}$ и -42°C соответственно. Среднегодовая скорость ветра 9 м/с, причем 182 дня в году скорость ветра превышает 15 м/с при максимальной 55 м/с; направление господствующего ветра юго-восточное. Среднегодовое количество осадков составляет 60 мм в виде снега (Абакумов и др., 2008; Dosachev, Gusev, 1980).

В западной части нунатака расположена российская сезонная полярная база Ленинградская, основанная в 1971 г. как круглогодичная полярная станция и законсервированная в 1991 г.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Исходные данные

Для геоморфометрического моделирования и картографирования нами использованы фрагменты цифровой модели рельефа (ЦМР) Reference Elevation Model of Antarctica (REMA) (Howat et al., 2019) с шагом сетки 2 и 8 м¹. REMA построена на основе сотен тысяч отдельных ЦМР, полученных фотограмметрическим способом по снимкам космических аппаратов WorldView-1, -2 и -3 субметрового разрешения. REMA — наиболее полная и точная ЦМР Антарктиды: на большей части покрытия абсолютная ошибка не превышает 1 м, а относительная ошибка — дециметры (Howat et al., 2019).

Из REMA нами были выделены три фрагмента, включающие в себя рассматриваемые территории. Фрагменты были перепроектированы из полярной стереографической проекции в проекцию UTM, зона 8S — для оазиса м. Бёркс, зона 46S — для о. Хасуэлл, зона 57S — для нунатака Ленинградский. Полученные таким образом ЦМР оазиса м. Бёркс (рис. 3а) описывает территорию размером 4350×3510 м (матрица высот 544×440 ; шаг сетки ЦМР 8 м), ЦМР о. Хасуэлл (рис. 3б) — 1330×1100 м (матрица высот 667×549 ; шаг сетки ЦМР 2 м), а ЦМР нунатака Ленинградский (рис. 3в) — 1360×760 м (матрица высот 680×379 ; шаг сетки ЦМР 2 м). В ЦМР оазиса м. Бёркс и о. Хасуэлл значения высот заданы только для суши, так как в REMA батиметрия отсутствует. ЦМР оазиса м. Бёркс была отредактирована, так как этот фрагмент REMA включал артефакты — образы айсбергов и припая. Для локализации артефактов использовались космические снимки и аэрофотоснимки.

¹ <https://www.pgc.umn.edu/data/rema> (дата обращения 10.05.2025).

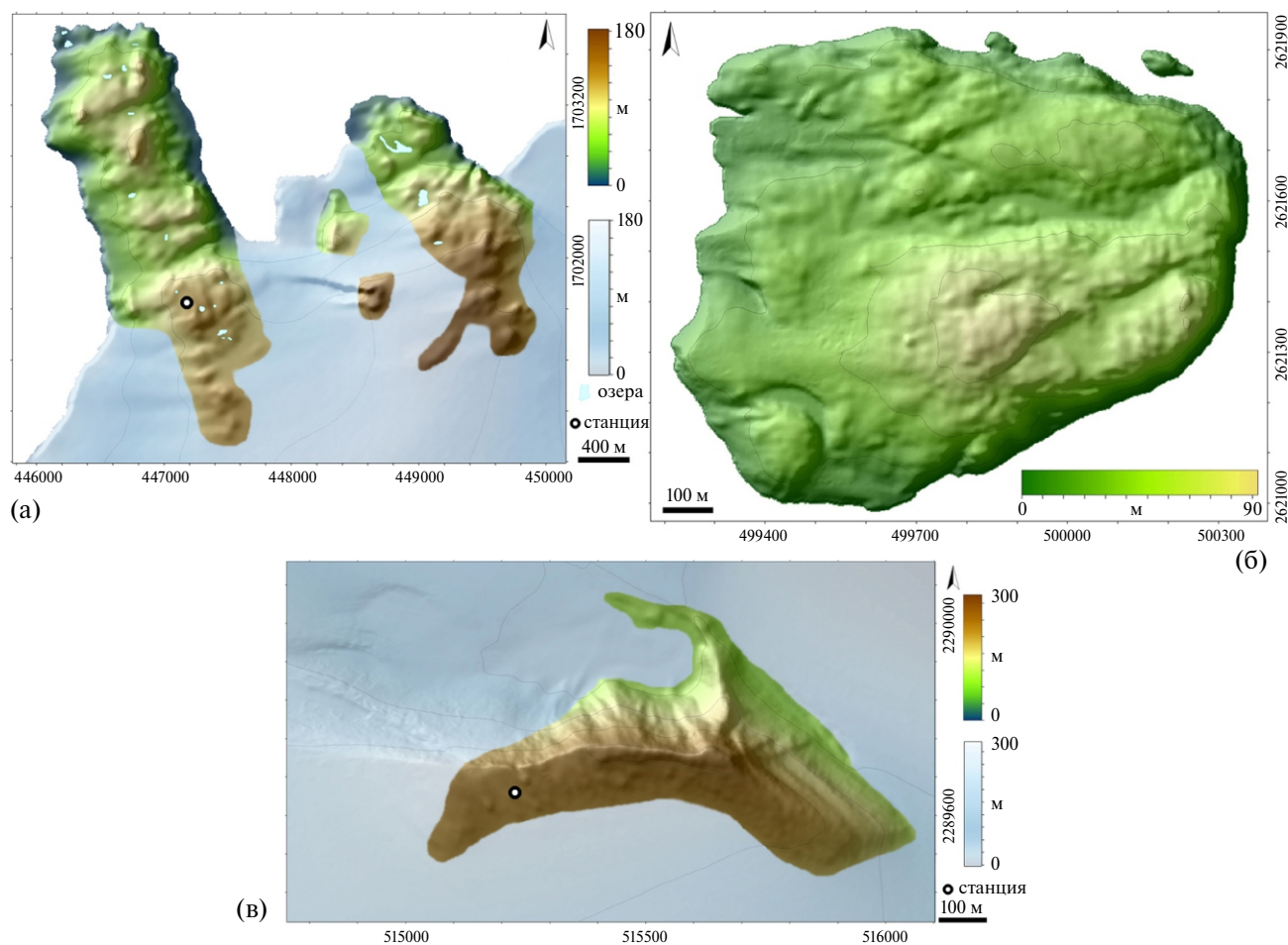


Рис. 3. Высоты: оазис м. Бёркс и прилегающий ледник (а); о. Хасуэлл (б); нунатак Ленинградский и прилегающий ледник (в).

Моделирование

По каждой из трех ЦМР были рассчитаны цифровые модели 10-ти наиболее значимых морфометрических величин, к которым относятся: крутизна склона (G), экспозиция склона (A), горизонтальная кривизна (k_h), вертикальная кривизна (k_v), минимальная кривизна ($k_{\min}$), максимальная кривизна ($k_{\max}$), индекс ветрового воздействия (WEx), водосборная площадь (CA), топографический индекс влажности (TWI) и индекс мощности потоков (SPI). Определения и краткие физико-математические и физико-географические интерпретации этих величин приведены в табл. 1, а подробное описание и формулы — в (Florinsky, 2025).

Сглаживание ЦМР не проводилось. Цифровые модели G , A и кривизн рассчитаны авторским конечно-разностным методом (Florinsky, 2025), модели WEx — методом Бёхнера (Böhner, 2004), а модели CA — с использованием алгоритма множественных направлений потока на основе максимального градиента (Qin et al., 2007). Так как CA характеризуется широким динамическим диапазоном значений, для последующей работы

модель CA была прологарифмирована. Расчет моделей TWI и SPI проведен на основе моделей CA и G . Для оазиса м. Бёркс, о. Хасуэлл и нунатака Ленинградский шаг сетки морфометрических моделей равен 8, 2 и 2 м соответственно.

Картографирование

По полученным ЦМР были построены гипсометрические карты рассматриваемых территорий (см. рис. 3), а по рассчитанным морфометрическим моделям — их морфометрические карты (рис. 4, 5, 6).

Для изображения высот рельефа была использована комбинация двух градиентных гипсометрических шкал (Флоринский, Жарнова, 2025): для отображения высот рельефа свободных от оледенения территорий — зелено-желтая часть стандартной спектральной шкалы цветовой пластики, а для отображения высот рельефа прилегающих ледников — модифицированная шкала рельефа полярных регионов. Затем послойная окраска была совмещена с цифровой ахроматической отмывкой рельефа и горизонталями (см. рис. 3).

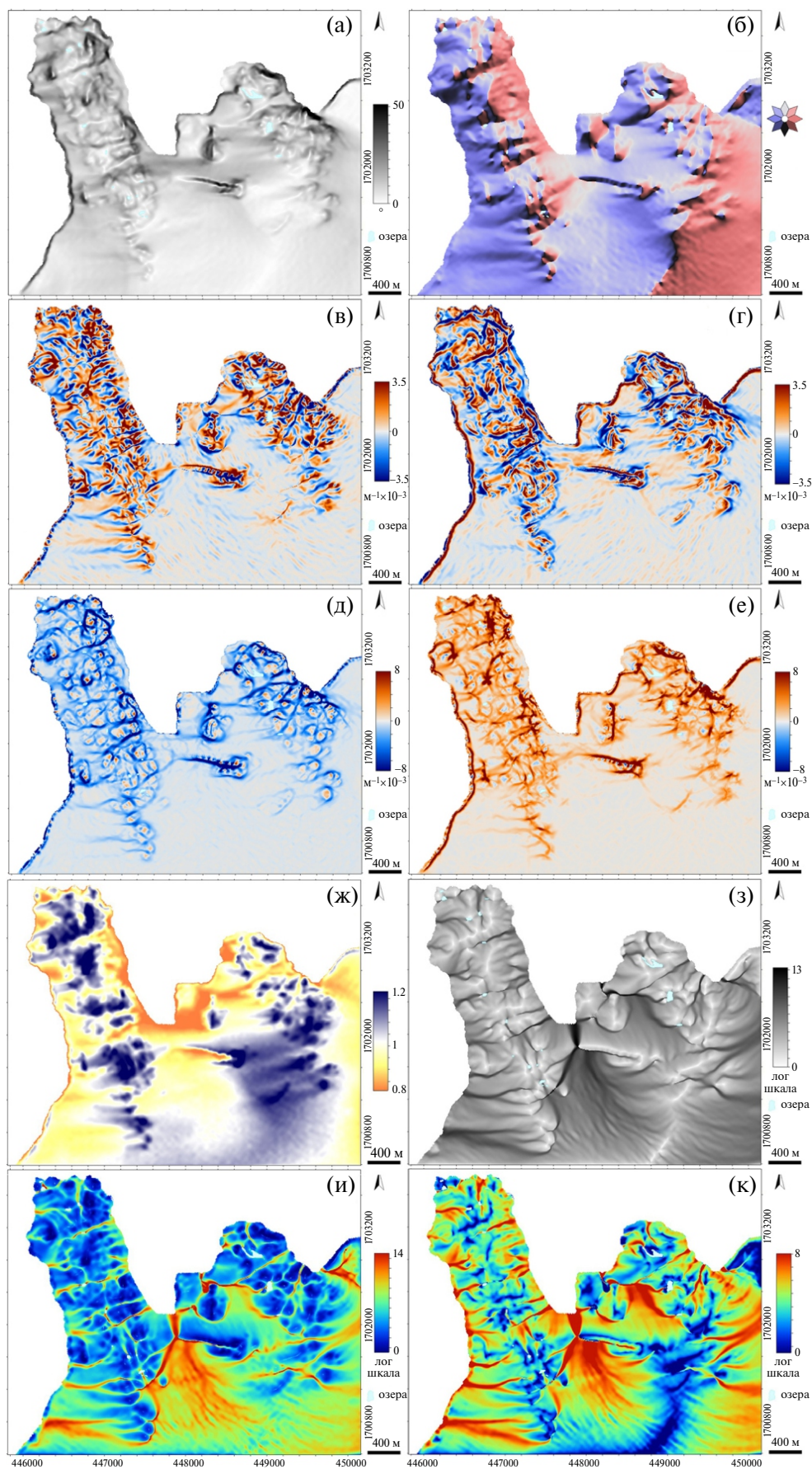


Рис. 4. Оазис м. Бёркс и прилегающий ледник: крутизна (а); экспозиция (б); горизонтальная кривизна (в); вертикальная кривизна (г); минимальная кривизна (д); максимальная кривизна (е); индекс ветрового воздействия (ж); водосборная площадь (з); топографический индекс влажности (и); индекс мощности потоков (к).

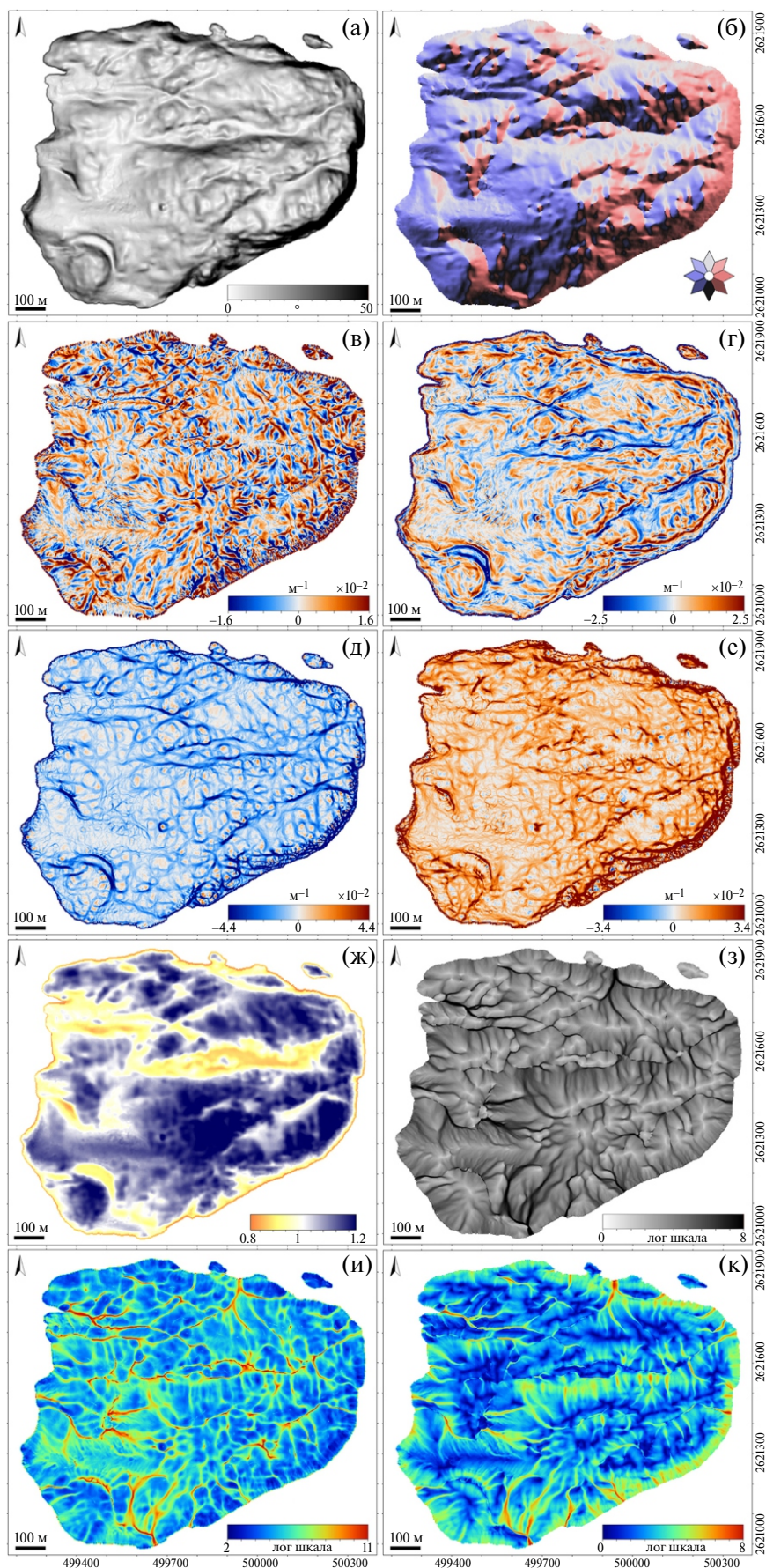


Рис. 5. Остров Хасуэлл: крутизна (а); экспозиция (б); горизонтальная кривизна (в); вертикальная кривизна (г); минимальная кривизна (д); максимальная кривизна (е); индекс ветрового воздействия (ж); водосборная площадь (з); топографический индекс влажности (и); индекс мощности потоков (к).

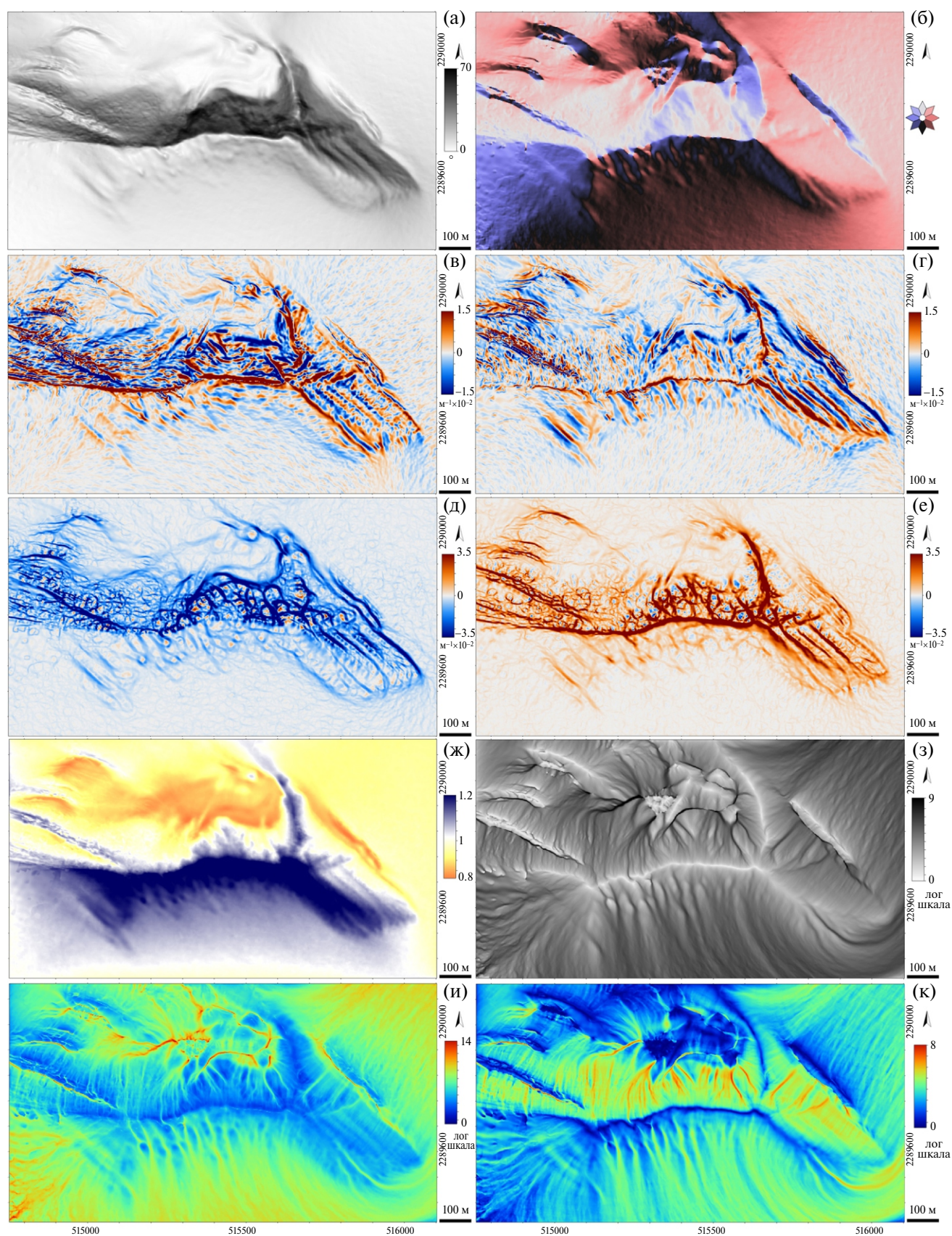


Рис. 6. Нунатак Ленинградский и прилегающий ледник: крутизна (а); экспозиция (б); горизонтальная кривизна (в); вертикальная кривизна (г); минимальная кривизна (д); максимальная кривизна (е); индекс ветрового воздействия (ж); водосборная площадь (з); топографический индекс влажности (и); индекс мощности потоков (к).

При картографировании G и CA , которые принимают только положительные значения, была использована серая шкала (минимальным значениям G и CA соответствует белый цвет, а максимальным — черный) (см. рис. 4а, 3, 5а, 3, 6а, 3). При картографировании A , которая является циклической величиной и принимает значения от 0° до 360° , была использована восьмирумбовая цветная шкала (см. рис. 4б, 5б, 6б).

При картографировании кривизн, которые могут принимать как отрицательные, так и положительные значения, имеющие противоположный физико-математический смысл и интерпретации, была применена двухцветная шкала, состоящая из двух контрастных частей — синей и оранжевой (отрицательные и положительные значения соответственно). Абсолютным максимальным и минимальным значениям кривизн соответствуют наиболее и наименее насыщенные оттенки синего или оранжевого цвета (см. рис. 4в–е, 5в–е, 6в–е).

При картографировании WEx , который принимает только положительные значения, была использована двухцветная шкала, состоящая из двух контрастных частей — оранжевой и фиолетовой (значения ниже и выше 1 соответственно). Наиболее насыщенные оранжевые и фиолетовые оттенки соответствуют минимальному и максимальному значениям WEx соответственно. При картографировании TWI и SPI , которые могут принимать только положительные значения, была использована стандартная шкала спектральных цветов (см. рис. 4и, к, 5и, к, 6и, к).

Все карты представлены в проекции UTM, зона 8S — для оазиса м. Бёркс (см. рис. 3а, 4), зона 46S — для о. Хасуэлл (см. рис. 3б, 5) и зона 57S — для нунатака Ленинградский (см. рис. 3в, 6).

В REMA отсутствует батиметрия озера, но, в отличие от морской акватории, ячейки озера не обозначены как “no data”, а содержат значения интерполированных прибрежных высот. В этой связи озера на полученных картах оазиса м. Бёркс (см. рис. 3а, 4) были маскированы с использованием его ортофотоплана².

Для предобработки и редактирования фрагментов REMA, геоморфометрического моделирования и картографирования использовалось программное обеспечение SAGA³.

² <https://aari.ru/assets/images/943/5keo90-943-karta-ozyorstantsii-russkaya.jpg> (дата обращения 10.05.2025).

³ <https://saga-gis.sourceforge.io/en/index.html> (дата обращения 10.05.2025).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Карты G (см. рис. 4а, 5а, 6а) наглядно показывают пространственное распределение крутизны склонов, а карты A (см. рис. 4б, 5б, 6б) — экспозиции склонов по восьми румбам. Известно, что рельеф контролирует тепловой, ветровой и гидрологический режимы склонов, влияя тем самым на распределение и свойства почв и растительности (Florinsky, 2025). Цифровые модели G и A , совместно с данными о положении Солнца на небесной сфере, могут использоваться для моделирования инсоляции (Geomorphometry, 2009). Информация о дифференциации склонов по степени инсоляции полезна для прогноза распределения примитивных почв и низших растений на свободных от оледенения территориях. Для уточнения такого прогноза можно применять цифровые модели и карты TWI и WEx (см. ниже), которые количественно описывают морфометрические предпосылки аккумуляции влаги и ветрового воздействия соответственно.

Карты k_h (см. рис. 4в, 5в, 6в) отображают пространственное распределение областей конвергенции и дивергенции поверхностных потоков ($k_h < 0$ и $k_h > 0$, синие и оранжевые оттенки соответственно). В геоморфологическом отношении эти области соответствуют отрогам долин и гребней соответственно (Florinsky, 2025). Карты k_v (см. рис. 4г, 5г, 6г) отображают распределение областей относительного замедления и ускорения поверхностных потоков ($k_v < 0$ и $k_v > 0$, синие и оранжевые оттенки соответственно). В геоморфологическом отношении карты k_v отображают обрывы, уступы, бровки террас и другие подобные формы рельефа или их элементы с резкими перегибами профиля склона (Florinsky, 2025). Карты k_h и k_v могут быть полезны при геоморфологических исследованиях.

k_h и k_v количественно описывают морфометрические предпосылки двух механизмов аккумуляции поверхностных потоков: их конвергенцию и относительное замедление. Поэтому совместное применение моделей k_h и k_v позволяет выявлять зоны относительной аккумуляции поверхностных потоков ($k_h < 0$ при $k_v < 0$) (Florinsky, 2025). Эти зоны обычно совпадают с узлами пересечения разломов и характеризуются повышенной трещиноватостью и проницаемостью пород. В этой связи в пределах зон аккумуляции может наблюдаться взаимодействие латеральных потоков вдоль поверхности и в приповерхностном слое (вода, растворенные и взвешенные вещества и т.п.) и вертикальных восходящих потоков (флюиды, грунтовые воды и пр.) (Florinsky, 2025). В этой связи карты зон

аккумуляции могут быть полезны для геохимических исследований открытых скальных поверхностей [см. пример в статье (Florinsky, 2023b)].

Карты $k_{\min}$ и $k_{\max}$ (см. рис. 4д, е, 5д, е, 6д, е) также целесообразно рассматривать совместно. Расчет и картографирование $k_{\min}$ и $k_{\max}$ позволяет выделять два типа вытянутых линейных форм рельефа: вогнутые ($k_{\min} < 0$, темно-синие линейные элементы — см. рис. 4д, 5д, 6д) и выпуклые ($k_{\max} > 0$, темно-оранжевые линейные элементы — см. рис. 4е, 5е, 6е) формы (Florinsky, 2025). В Антарктике такие линейные элементы обычно интерпретируются как локальные разломы и зоны трещиноватости, проявление в рельефе которых вне ледникового покрова усилено эрозионными, экзарационными и нивальными процессами (Флоринский, Жарнова, 2025; Florinsky, 2023b). Таким образом, карты $k_{\min}$ и $k_{\max}$ информативны в структурно-геологическом отношении. Исследователи могут использовать модели $k_{\max}$ и $k_{\min}$ для составления карт линейных элементов свободных от оледенения территорий [см. пример в статье (Florinsky, 2023b)] и применять эту информацию совместно с другими геологическими и геофизическими данными.

Карты WEx (см. рис. 4ж, 5ж, 6ж) наглядно показывают пространственное распределение подветренных и наветренных участков местности ($WEx < 1$ и $WEx > 1$, оранжевые и фиолетовые оттенки соответственно) и степень их защищенности от ветра всех возможных направлений (Florinsky, 2025). Известно, что в Антарктике одним из главных метеорологических факторов, определяющих микроклимат, является ветер (прежде всего кatabатический). Поэтому модели WEx могут использоваться, в частности, для анализа пространственного распределения естественных укрытий от ветра, в которых могут существовать примитивные почвы, почвенная фауна и низшие растения, располагаться колонии птиц.

На картах CA (см. рис. 4з, 5з, 6з) хорошо видны пространственная структура и элементы водосборных бассейнов, в частности, водоразделы и тальвеги в виде светлых и темных линий (минимальные и максимальные значения CA соответственно). Модели CA могут применяться для определения и уточнения строения водосборных бассейнов свободных от оледенения территорий, а также использования этих данных в гидрологических и геохимических исследованиях.

Карты TWI (см. рис. 4и, 5и, 6и) могут интерпретироваться как прогнозные карты аккумуляции влаги в ландшафте (Florinsky, 2025). TWI достигает высоких значений (желтые и красные

оттенки, наиболее увлажненные участки) на участках с высокими значениями CA при низких значениях G (т.е., участки местности с большой площадью вышележащего водосбора и выположенным рельефом). Модели TWI могут использоваться, в частности, для прогнозного картографирования содержания влаги в грунтах на свободных ото льда территориях (Флоринский, Жарнова, 2025; Florinsky, 2023b).

Карты SPI (см. рис. 4к, 5к, 6к) могут быть интерпретированы как прогнозные карты эрозии и связанных с ней процессов (Florinsky, 2025). SPI достигает высоких значений (желтые и красные оттенки, высокая степень эрозии) на участках с высокими значениями как CA , так и G (т.е., участки местности с крутыми склонами и большой площадью вышележащего водосбора). Модели SPI могут быть полезны для прогнозного картографирования эрозии на свободных от оледенения территориях (Флоринский, Жарнова, 2025).

Отметим, что морфометрические паттерны свободных от оледенения территорий и примыкающих ледников существенно отличаются друг от друга (см. рис. 4, 6). Такой контраст связан с высокой степенью гладкости поверхности ледников и с шероховатостью и расчлененностью свободных от оледенения участков (Флоринский, Жарнова, 2025).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые проведено геоморфометрическое моделирование и картографирование трех типичных перигляциальных антарктических территорий — оазиса м. Бёркс, о. Хасуэлл и нунатака Ленинградский. Для этих объектов рассчитаны цифровые морфометрические модели, на основе которых созданы серии крупномасштабных морфометрических карт десяти наиболее значимых морфометрических величин. Для каждой территории карты созданы в одном масштабе, что обеспечивает простоту их сопоставления.

Каждая морфометрическая карта количественно описывает определенное свойство геометрии рельефа и обладает уникальной физико-математической и физико-географической интерпретацией; морфометрические карты одной серии взаимно дополняют друг друга. Полученные морфометрические карты строго, количественно и воспроизводимо описывают рельеф трех типичных перигляциальных территорий Антарктики и в перспективе могут быть использованы для их геологических, геоморфологических, гляциологических, гидрологических и экологических исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Абакумов Е.В., Помелов В.Н., Крыленков В.А., Вла-
сов Д.Ю. Морфологическая организация почв
Западной Антарктики // Вестн. СПб. ун-та. Се-
рия 3: Биология. 2008. Вып. 3. С. 102–116.
- Булавинцев В.И. Наземная фауна Южной полярной
области // Антарктика. Доклады Комиссии / отв.
ред. В.М. Котляков. М.: Наука, 1995. Вып. 33.
С. 140–156.
- Воронов П.С., Климов Л.В. Геологическое строение
района Мирного // Тр. Советской антарктиче-
ской экспедиции. 1960. Т. 9. С. 185–196.
- Короткевич Е.С. Полярные пустыни. Л.:
Гидрометеиздат, 1972. 419 с.
- Лупачев А.В., Абакумов Е.В. Почвы Земли Мэри Бэрд
(Западная Антарктика) // Почвоведение. 2013.
№ 10. С. 1167–1180.
- Марков К.К., Бардин В.И., Лебедев В.Л., Орлов А.И.,
Суетова И.А. География Антарктиды. М.: Мысль,
1968. 440 с.
- Орлов А.И. Некоторые результаты физико-географи-
ческих исследований на Берегу Отса // Тр. Со-
ветской антарктической экспедиции. 1973. Т. 59.
С. 130–137.
- План управления Особо охраняемым районом Ан-
тарктики № 127 “Остров Хасуэлл” (Остров Ха-
суэлл и прилегающий участок припайного льда
с колонией императорских пингвинов) // За-
ключительный отчет XLIV Консультативного
совещания по Договору об Антарктике, Мера 11.
Буэнос-Айрес: Секретариат Договора об Антарк-
тике, 2022. 16 с.
- Симонов И.М. Оазисы Восточной Антарктиды. Л.:
Гидрометеиздат, 1971. 176 с.
- Симонов И.М. Физико-географическая характери-
стика полуострова Файлдс (Южные Шетландские
острова) // Антарктика. Докл. Комиссии / отв. ред.
Г.А. Авсюк. М.: Наука, 1975. Вып. 14. С. 128–145.
- Сократова И.Н. Антарктические оазисы: история и ре-
зультаты исследований. СПб.: ААНИИ, 2010. 274 с.
- Солопов А.В. Теоретическая оценка процессов взаи-
мовлияния и взаимодействия оазисов и ледни-
ков в Антарктиде // Антарктика. Докл. Комис-
сии 1969 / отв. ред. В.А. Бугаев. М.: Наука, 1971.
С. 129–143.
- Солопов А.В. Об основных физико-географических
признаках оазисов и некоторых закономерно-
стях их формирования // Антарктика. Докл.
Комиссии / отв. ред. В.А. Бугаев. М.: Наука, 1973.
Вып. 12. С. 64–71.
- Сыроечковский Е.Е. Орнитологические наблюдения
в Антарктиде и некоторые вопросы биогеографии
суши Антарктики // Антарктика. Докл. Комис-
сии 1965 / отв. ред. В.А. Бугаев. М.: Наука, 1966.
С. 103–129.
- Ткачева Д.А., Михальский Е.В., Сущевская Н.М., Ку-
наккузин Е.Л., Скублов С.Г., Сергеев С.А. Возраст
и геохимическая характеристика габброидов
мыса Беркс (район станции Русская, Западная
Антарктида) // Геохимия. 2018. № 7. С. 616–640.
<https://doi.org/10.1134/S0016752518070129>
- Фадеев А.С., Мханна А.И.Н. Сравнение и анализ
метеорологических элементов станций Вос-
ток и Мирный с 2015 по 2020 года // Scientific
Heritage. 2021. Vol. 2. № 79. Р. 44–53.
<https://doi.org/10.24412/9215-0365-2021-79-2-44-53>
- Флоринский И.В. Геоморфометрия сегодня // Ин-
терКарто. ИнтерГИС. 2021. Т. 27. № 2. С. 394–
448.
<https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-2-27-394-448>
- Флоринский И.В. Проект геоморфометрического атла-
са свободных от оледенения территорий Антарк-
тики // ИнтерКарто. ИнтерГИС. 2024. Т. 30. № 2.
С. 53–79.
<https://doi.org/10.35595/2414-9179-2024-2-30-53-79>
- Флоринский И.В., Жарнова С.О. Геоморфометриче-
ское моделирование и картографирование оази-
са Бангера (Восточная Антарктида) // Геодезия
и картография. 2025. № 3. С. 13–25.
<https://doi.org/10.22389/0016-7126-2025-1017-3-13-25>
- Харченко С.В. Новые задачи морфометрии рельефа
и автоматизированные морфологические клас-
сификации в геоморфологии // Геоморфология.
2020. № 1. С. 3–21.
<https://doi.org/10.31857/S043542812001006X>
- Böhner J. Regionalisierung bodenrelevanter Klimaparam-
eter für das Niedersächsische Landesamt für Boden-
forschung (NLfB) und die Bundesanstalt für Geow-
issenschaften und Rohstoffe (BGR) // Arbeitshefte
Boden. 2004. № 4. Р. 17–66.
- Dosachev I.D., Gusev V.P. The medical geography of
Leningradskaya station (Antarctica) // Polar Geogr.
Geol. 1980. Vol. 4. № 1. Р. 50–52.
<https://doi.org/10.1080/10889378009377129>
- Evans I.S. General geomorphometry, derivatives of
altitude, and descriptive statistics // Spatial Analysis
in Geomorphology / R.J. Chorley (Ed.). London:
Methuen, 1972. Р. 17–90.
- Florinsky I.V. Geomorphometric modeling and mapping
of Antarctic oases // ArXiv Preprints. 2023a.
№ 2305.07523. Р. 1–84.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.07523>
- Florinsky I.V. Larsemann Hills: geomorphometric
modeling and mapping // Polar Science. 2023b.
Vol. 38. Art. 100969.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2023.100969>
- Florinsky I.V. Digital Terrain Analysis, 3rd rev. enl. ed.
London: Elsevier Academic Press, 2025. 455 p.
<https://doi.org/10.1016/C2023-0-51092-4>
- Geomorphometry: Concepts, Software, Applications /
T. Hengl, H.I. Reuter (Eds.). Amsterdam: Elsevier,
2009. 765 p.

- Howat I.M., Porter C., Smith B.E., Noh M.-J., Morin P. The Reference Elevation Model of Antarctica // Cryosphere. 2019. Vol. 13. № 2. P. 665–674. <https://doi.org/10.5194/tc-13-665-2019>
- Lupachev A.V., Abakumov E.V., Abramov A.A., Goryachkin S.V., Gilichinsky D.A. Soils of Marie Byrd Land // The Soils of Antarctica / J.G. Bockheim (Ed.). Cham: Springer, 2015. P. 183–203. https://doi.org/10.1007/978-3-319-05497-1_11
- Minár J., Drăguț L., Evans I.S., Feciskanin R., Gallay M., Jenčo M., Popov A. Physical geomorphometry for elementary land surface segmentation and digital geomorphological mapping // Earth-Sci. Rev. 2024. Vol. 248. Art. 104631. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104631>
- Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications // Hydrol. Process. 1991. Vol. 5. № 1. P. 3–30. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>
- Ochyra R., Lewis Smith R.I., Bednarek-Ochyra H. Illustrated Moss Flora of Antarctica. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2008. 704 p.
- Øvstedal D.O., Lewis Smith R.I. Lichens of Antarctica and South Georgia: A Guide to Their Identification and Ecology. Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2001. 424 p.
- Qin C., Zhu A.-X., Pei T., Li B., Zhou C., Yang L. An adaptive approach to selecting a flow-partition exponent for a multiple-flow-direction algorithm // Int. J. Geogr. Inform. Sci. 2007. Vol. 21. № 4. P. 443–458. <https://doi.org/10.1080/13658810601073240>
- Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis // Geoderma. 2002. Vol. 107. № 1–2. P. 1–32. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00136-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00136-7)
- Terrain Analysis: Principles and Applications / J.P. Wilson, J.C. Gallant (Eds.). NY: Wiley, 2000. 479 p.
- The Soils of Antarctica / J.G. Bockheim (Ed.). Cham: Springer, 2015. 322 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-05497-1>
- Wilson J.P. Environmental Applications of Digital Terrain Modeling. Chichester: Wiley-Blackwell, 2018. 360 p. <https://doi.org/10.1002/9781118938188>
- Xiong L., Li S., Tang G., Strobl J. Geomorphometry and terrain analysis: data, methods, platforms and applications // Earth-Sci. Rev. 2022. Vol. 233. Art. 104191. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104191>

Geomorphometry of Antarctic Periglacial Territories

I. V. Florinsky*

Institute of Mathematical Problems of Biology, Keldysh Institute of Applied Mathematics, Russian Academy of Sciences, Pushchino, Moscow oblast, Russia

*e-mail: iflor@mail.ru

Currently, the rigor and reproducibility of topographic studies is ensured by geomorphometry. This discipline emerged at the intersection of photogrammetry, geoinformatics, and computational mathematics. It has a well-developed physical and mathematical theory, as well as a powerful computational apparatus. Geomorphometric methods are used to solve a wide range of multiscale problems within the field of geoscience. Geomorphometric modeling of Antarctic periglacial territories, such as oases, ice-free islands and mountains, is necessary to obtain new knowledge about quantitative characteristics of the topography of these unique territories as well as further use of morphometric information. This article considers three typical Antarctic periglacial territories: the Cape Burks Oasis (Marie Byrd Land), Haswell Island (Queen Mary Land), and Leningradsky Nunatak (Oates Land). Geomorphometric modelling and mapping of these territories were carried out for the first time. We used three fragments of the Reference Elevation Model of Antarctica (REMA) as input data, with grid spacings of 2 and 8 metres. We calculated digital models using three DEMs and presented a series of maps of the ten most important morphometric variables in fundamental and applied terms. The list of variables includes slope gradient, slope aspect, horizontal curvature, vertical curvature, minimal curvature, maximal curvature, wind exposition index, catchment area, topographic wetness index, and stream power index. Interpretations of the obtained maps are given and their possible use is described. The study was carried out within the framework of a project to create a physical-geographical thematic scientific reference geomorphometric atlas of ice-free territories of the Antarctic.

Keywords: topography, digital terrain modeling, geomorphometry, Antarctica, Antarctic oasis, nunatak

REFERENCES

- Abakumov E.V., Pomelov V.N., Vlasov D.Y., Krylenkov V.A. Morphological organization of soils in Western Antarctica. *Vestn. S.-Peteb. Univ., Ser. 3: Biol.*, 2008, no. 3, pp. 102–116. (In Russ.).
- Böhner J. Regionalisierung bodenrelevanter Klimaparameter für das Niedersächsische Landesamt für Bodenforschung (NLfB) und die Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR). *Arbeitshefte Boden*, 2004, no. 4, pp. 17–66. (In German).
- Bulavintsev V.I. Terrestrial fauna of the southern polar region. In *Antarktika. Doklady Komissii. Vyp. 33* [The Antarctic: The Committee Reports. Vol. 33]. Kotlyakov V.M., Ed. Moscow: Nauka Publ., 1995, pp. 140–156. (In Russ.).
- Dosachev I.D., Gusev V.P. The medical geography of Leningradskaya station (Antarctica). *Polar Geogr. Geol.*, 1980, vol. 4, no. 1, pp. 50–52.
<https://doi.org/10.1080/10889378009377129>
- Evans I.S. General geomorphometry, derivatives of altitude, and descriptive statistics. In *Spatial Analysis in Geomorphology*. Chorley R.J., Ed. London: Methuen, 1972, pp. 17–90.
- Fadeev A.S., Mhanna A.I.N. Comparison and analysis of meteorological elements of Vostok and Mirny Stations from 2015 to 2020. *Nauchn. Nasled.*, 2021, vol. 2, no. 79, pp. 44–53. (In Russ.).
<https://doi.org/10.24412/9215-0365-2021-79-2-44-53>
- Florinsky I.V. Geomorphometry today. *InterCarto. InterGIS*, 2021, vol. 27, no. 2, pp. 394–448. (In Russ.).
<https://doi.org/10.35595/2414-9179-2021-2-27-394-448>
- Florinsky I.V. Geomorphometric modeling and mapping of Antarctic oases. *ArXiv Preprints*, 2023a, no. 2305.07523, pp. 1–84.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2305.07523>
- Florinsky I.V. Larsemann Hills: geomorphometric modeling and mapping. *Polar Science*, 2023b, vol. 38, art. 100969.
<https://doi.org/10.1016/j.polar.2023.100969>
- Florinsky I.V. A project of a geomorphometric atlas of ice-free Antarctic territories. *InterCarto. InterGIS*, 2024, vol. 30, no. 2, pp. 53–79. (In Russ.).
<https://doi.org/10.35595/2414-9179-2024-2-30-53-79>
- Florinsky I.V. *Digital Terrain Analysis*, 3rd rev. enl. ed. London: Elsevier, 2025.
<https://doi.org/10.1016/C2023-0-51092-4>
- Florinsky I.V., Zharnova S.O. Geomorphometric modeling and mapping of the Bunger Oasis, East Antarctica. *Geodesiya Kartogr.*, 2025, vol. 86, no. 3, pp. 13–25. (In Russ.).
<https://doi.org/10.22389/0016-7126-2025-1017-3-13-25>
- Geomorphometry: Concepts, Software, Applications*. Hengl T., Reuter H.I., Eds. Amsterdam: Elsevier, 2009.
- Howat I.M., Porter C., Smith B.E., Noh M.-J., Morin P. The reference elevation model of Antarctica. *Cryosphere*, 2019, vol. 13, no. 2, pp. 665–674.
<https://doi.org/10.5194/tc-13-665-2019>
- Kharchenko S.V. New challenges of geomorphometry and automatic morphological classifications in geomorphology. *Geomorf.*, 2020, no. 1, pp. 3–21. (In Russ.).
<https://doi.org/10.31857/S043542812001006X>
- Korotkevich E.S. *Polyarnye pustyni* [Polar Deserts]. Leningrad: Hydrometeoizdat Publ., 1972.
- Lupachev A.V., Abakumov E.V. Soils of Marie Byrd Land, West Antarctica. *Eurasian Soil Sci.*, 2013, vol. 46, no. 10, pp. 994–1006.
<https://doi.org/10.1134/S1064229313100049>
- Lupachev A.V., Abakumov E.V., Abramov A.A., Goryachkin S.V., Gilichinsky D.A. Soils of Marie Byrd Land. In *The Soils of Antarctica*. Bockheim J.G., Ed. Cham: Springer, 2015, pp. 183–203.
https://doi.org/10.1007/978-3-319-05497-1_11
- Markov K.K., Bardin V.I., Lebedev V.L., Orlov A.I., Svetova I.A. *The Geography of Antarctica*. Jerusalem: Israel Program for Scientific Translations, 1970.
- Management plan for Antarctic Specially Protected Area No. 127 “Haswell Island” (Haswell Island and the adjacent fast ice field with a colony of emperor penguins). In *Final Report of the XLIV Antarctic Treaty Consultative Meeting. Measure 11*. Buenos Aires: Secretariat of the Antarctic Treaty, 2022.
- Minár J., Drăguț L., Evans I.S., Feciskanin R., Galay M., Jenčo M., Popov A. Physical geomorphometry for elementary land surface segmentation and digital geomorphological mapping. *Earth-Sci. Rev.*, 2024, vol. 248, art. 104631.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104631>
- Moore I.D., Grayson R.B., Ladson A.R. Digital terrain modelling: A review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydrol. Process.*, 1991, vol. 5, no. 1, pp. 3–30.
<https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>
- Ochyra R., Lewis Smith R.I., Bednarek-Ochyra H. *Illustrated Moss Flora of Antarctica*. Cambridge: CUP, 2008.
- Orlov A.I. Some results of physical geographical studies on the Oates Coast. *Tr. Sovet. Antarktich. Eksped.*, 1973, vol. 59, pp. 130–137. (In Russ.).
- Øvstedal D.O., Lewis Smith R.I. *Lichens of Antarctica and South Georgia: A Guide to Their Identification and Ecology*. Cambridge: CUP, 2001.
- Qin C., Zhu A.-X., Pei T., et al. An adaptive approach to selecting a flow-partition exponent for a multiple-flow-direction algorithm. *Int. J. Geogr. Inform. Sci.*, 2007, vol. 21, no. 4, pp. 443–458.
<https://doi.org/10.1080/13658810601073240>
- Shary P.A., Sharaya L.S., Mitusov A.V. Fundamental quantitative methods of land surface analysis. *Geoderma*, 2002, vol. 107, no. 1–2, pp. 1–32.
[https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00136-7](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00136-7)
- Simonov I.M. *Oazisy Vostochnoi Antarktidi* [Oases of East Antarctica]. Leningrad: Hydrometeoizdat Publ., 1971.

- Simonov I.M. Physical and geographical characteristics of the Fildes Peninsula (South Shetland Islands). In *Antarktika. Doklady Komissii. Vyp. 14* [The Antarctic: The Committee Reports. Vol. 14]. Avsyuk G.A., Ed. Moscow: Nauka Publ., 1975, pp. 128–145. (In Russ.).
- Sokratova I.N. *Antarkticheskie oazisy: istoriya i rezul'taty issledovaniy* [Antarctic Oases: History and Results of Investigations]. St. Petersburg: AANII, 2010.
- Solopov A.V. Theoretical assessment of the processes of mutual influence and interaction of oases and glaciers in Antarctica. In *Antarktika. Doklady Komissii 1969* [The Antarctic: The Committee Reports 1969]. Bugaev V.A., Ed. Moscow: Nauka Publ., 1971, pp. 129–143. (In Russ.).
- Solopov A.V. On the main physical and geographical features of oases and some regularities of their formation. in *Antarktika. Doklady Komissii. Vyp. 12* [The Antarctic: The Committee Reports. Vol. 12]. Bugaev V.A., Ed. Moscow: Nauka Publ., 1973, pp. 64–71. (In Russ.).
- Syroechkovskii E.E. Ornithological observations in Antarctica and some issues of the biogeography of the Antarctic land. In *Antarktika. Doklady Komissii 1965* [The Antarctic: The Committee Reports 1965]. Bugaev V.A., Ed. Moscow: Nauka Publ., 1966, pp. 103–129. (In Russ.).
- Terrain Analysis: Principles and Applications*. Wilson J.P., Gallant J.C., Eds. New York: Wiley, 2000.
- The Soils of Antarctica*. Bockheim J.G., Ed. Cham: Springer, 2015.
<https://doi.org/10.1007/978-3-319-05497-1>
- Tkacheva D.A., Mikhalsky E.V., Sushchevskaya N.M., Kunakkuzin E.L., Skublov S.G., Sergeev S.A. Age and geochemistry of the Cape Burks gabbroids (Russkaya Station Area, West Antarctica). *Geochem. Int.*, 2018, vol. 56, no. 7, pp. 628–650.
<https://doi.org/10.1134/S001670291807011X>
- Voronov P.S., Klimov L.V. Geological structure of the Mirny region. *Tr. Sovet. Antarktich. Eksped.*, 1960, vol. 9, pp. 185–196. (In Russ.).
- Wilson J.P. *Environmental Applications of Digital Terrain Modeling*. Chichester: Wiley-Blackwell, 2018.
<https://doi.org/10.1002/9781118938188>
- Xiong L., Li S., Tang G., Strobl J. Geomorphometry and terrain analysis: data, methods, platforms and applications. *Earth-Sci. Rev.*, 2022, vol. 233, art. 104191.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2022.104191>