

УДК 550.3

Подлёдный рельеф и подледниковые водоёмы Антарктиды

С.В. Попов

АО «Полярная морская геологоразведочная экспедиция», Россия, Санкт-Петербург; Санкт-Петербургский государственный университет, Санкт-Петербург

Bedrock topography and subglacial lakes of Antarctica

S.V. Popov

Polar Marine Geosurvey Expedition, Russia, St. Petersburg;
Saint Petersburg State University, Russia, St. Petersburg

spopov67@yandex.ru

Summary. The square of Antarctica (with the ice shelves, islands and ice capes) is 15926.087 thousand square km. However this value should be considered approximate due to variations of the coastline of the ice shelves. Antarctica is glaciated by approximately 92%. Its average thickness is 1937 m with a maximal value of 4897 m. The total volume of ice is estimated at 26.92 million cubic km which corresponds to 24.69×10^{33} tons. If it melts, then the sea level rise by 58 m. Bedrock topography of Antarctica is as diverse as on other continents. Absolute heights varies from -2000 m in the southern part of the Amery Ice Shelf up to 5140 m in the uncovered by ice Ellsworth Mountains. Most of Antarctica is characterized by bottom melting. This leads to the formation of subglacial lakes, as well as an increase in the intensity of erosion processes that change the appearance of the subglacial relief.

Keywords: *Antarctica, subglacial relief, bedrock topography, subglacial lakes, ice sheet.*

Резюме. Антарктида (вместе с шельфовыми ледниками, островами и ледяными куполами) занимает территорию 15 926 087 км². Однако эту величину следует считать примерной из-за вариаций береговой линии шельфовых ледников. Антарктида покрыта ледником примерно на 92%. Его средняя мощность составляет 1937 м при максимальном значении 4897 м. Общий объём льда оценивается в 26,92 млн км³, что соответствует $24,69 \times 10^{33}$ тонн. Если он растает, то уровень Мирового океана поднимется на 58 м. Коренной рельеф Антарктиды столь же разнообразен, как и на других континентах. Высотные отметки варьируют от -2000 м в южной части шельфового ледника Эймери до 5140 м на обнажённых участках гор Элсуерта. Для большей части Антарктиды характерно донное таяние. Это приводит к образованию подледниковых водоёмов, а также повышению интенсивности эрозионных процессов, меняющих облик подлёдного рельефа.

Ключевые слова: *Антарктида, подлёдный рельеф, коренной рельеф, подледниковые водоёмы, ледниковый покров.*

Введение

Впервые антарктический берег увидели офицеры и матросы Российского флота. Это событие произошло 28 января (16 января по старому стилю) 1820 г. Вот как оно описывается участником тех событий капитаном 2-го ранга Ф.Ф. Беллинсгаузеном *«В два часа пополудни (16-го января – С.П.) с салинга (т.е. со второй площадки мачты – С.П.) увидели сплошной лёд, внутри коего затерто несколько больших льдяных островов. В 3 часа заметили необыкновенную перемену цвета поверхности моря. Таковое явление мгновенно бросится в глаза, особенно когда они ежедневно привыкли видеть синеватый цвет моря, и вдруг оно потемнело; я лег в дрейф и бросил лот, но 145-ю саженьями дна не достали, однакоже мы начали предполагать, что берег близко. Видя невозможность, по причине встретившегося льда, идти далее к югу, мы легли на НО, вдоль сплошного льда, который, образовался мысами. Здесь нас встретили снежные белые бурные птицы, курица Эгмондской гавани и морские ласточки; сих последних я всегда полагаю непременно предвестницами близости берега, ибо считаю их в числе прибрежных птиц. К вечеру, находясь в широте $69^{\circ} 8$ южной, долготе $76^{\circ} 51' 46''$ западной, определили склонение компаса $32^{\circ} 3'$ восточное»* (Беллинсгаузен, 1949).

Антарктические оазисы, непокрытые льдом участки суши, и цепи скалистых гор люди увидели значительно позже, а первое целостное представление о рельефе скрытого льдом континента было получено лишь в середине прошлого века, в результате исследований по программе первого Международного геофизического года (МГГ, 1957–1958 гг.) и в последующие несколько лет. Результатом обобщения международных исследований того времени стало издание в Советском Союзе первого в мире Атласа Антарктики, который состоял из двух томов: комплекта карт и развёрнутого описания (Атлас Антарктики, 1966, 1969). На сегодняшний день наиболее точные карты мощности ледникового покрова и коренного рельефа (т.е. подлёдного рельефа с учётом слоя воды под шельфовыми ледниками и подледниковыми водоёмами) подготовлены по результатам международного проекта Bedmap2. Он посвящён пополнению имеющейся (по результатам проекта Bedmap) базы данных по мощности антарктического ледника и высотам подлёдной поверхности с последующим изданием соответствующих карт и цифровых моделей. Схемы и методика их составления приведены в работе (Fretwell et al., 2013).

Ледниковый покров Антарктиды

Антарктида (вместе с шельфовыми ледниками, островами и ледяными куполами) занимает территорию 15 926 087 км² (Williams, Ferrigno, 2012). Однако эту величину следует считать примерной из-за вариаций береговой линии шельфовых ледников. Она изменяется из-за их циклического роста и сокращения. Рост связан с растеканием покровного ледника. По достижении некоторого предельного размера приливные процессы и воздействие морских волн приводят к его разрушению, т.е. отколам айсбергов. Затем этот процесс повторяется снова и снова. Самый большой из известных айсбергов размером около 200 км × 100 км в октябре 1985 г. откололся от шельфового ледника Фильхнера – Ронне (Попов, 2017б).

Антарктида покрыта ледником примерно на 92%. Основная часть обнажённой территории сосредоточена в Трансантарктических горах и на Антарктическом полуострове (рис. 1). Его оконечность, мыс Сифре, достигает 63°13' ю.ш. Это самая северная точка материка. По геологическому строению, характеру рельефа дневной поверхности и мощности ледника, Антарктида подразделяется на Восточную и Западную. Восточно-антарктический и Западно-антарктический ледниковые покровы (или щиты) представляют собой пологий купол, круто ниспадающий к океану, напоминая в профиле эллиптическую кривую. Такую форму поверхности принимает лёд, свободно растекающийся на плоском основании. Наивысшая точка антарктического ледникового купола располагается на высоте около 4100 м (купол Аргус). Самой высокой горной вершиной, свободной ото льда, является массив Винсон (5140 м, хребет Сентинел в горах Элсуерта). Значительную территорию занимают шельфовые ледники, т.е. ледники, находящиеся на плаву (см. рис. 1). Площадь самого большого из них, шельфового ледника Росса, составляет 536 070 км² (Williams, Ferrigno, 2012).

Мощность ледника достаточно закономерно нарастает от периферийных прибрежных участков к центральным районам континента и контролируется подлёдным рельефом: наибольшие значения приурочены к долинам и впадинам, а наименьшие наблюдаются в районе подлёдных горных сооружений. Схема мощности ледникового покрова Антарктиды, составленная по данным проекта Bedmap2 (Fretwell et al., 2013), показана на рис. 2. На ней выделяются три области, характеризующиеся максимальными значениями. Первая из них соответ-

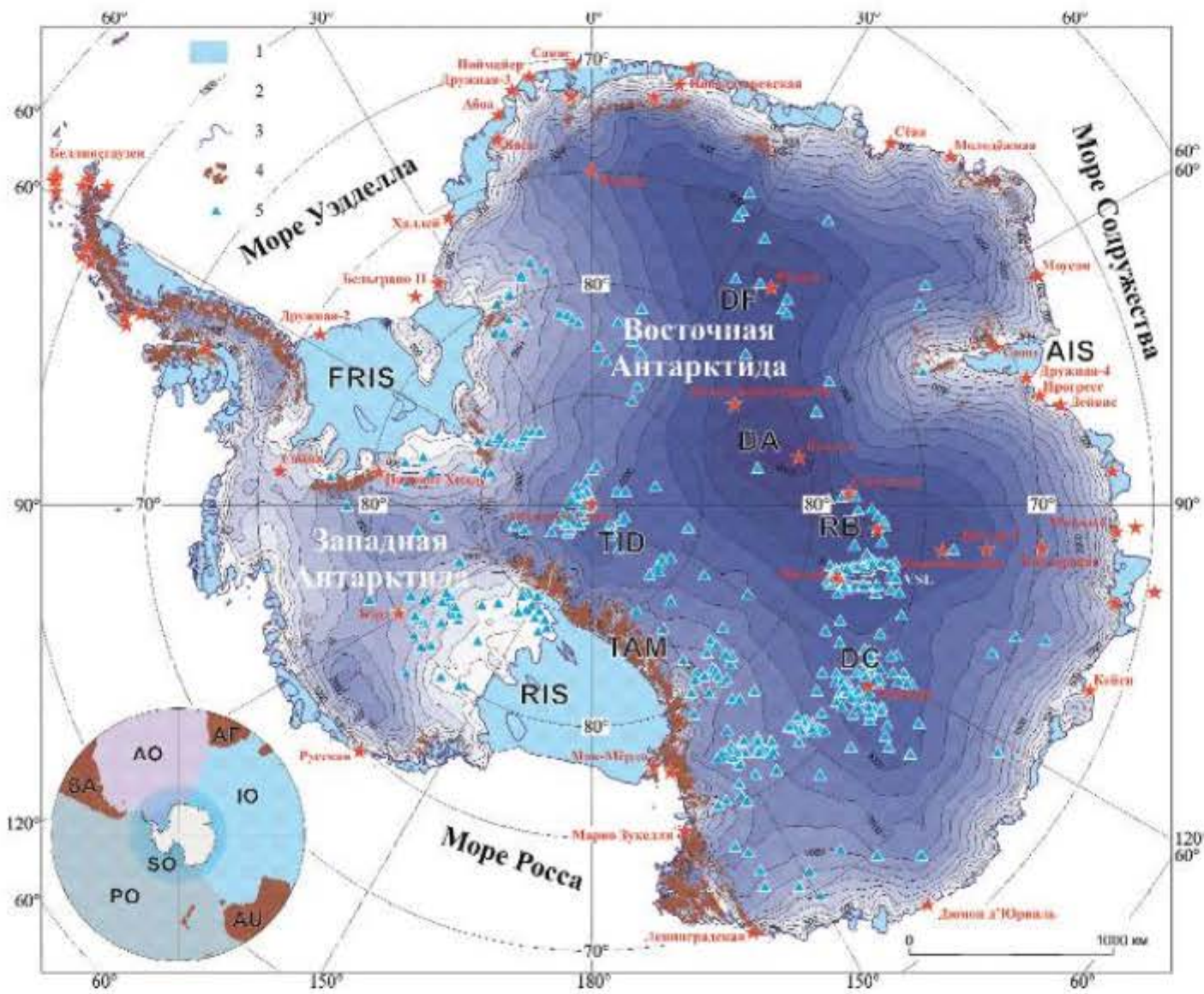
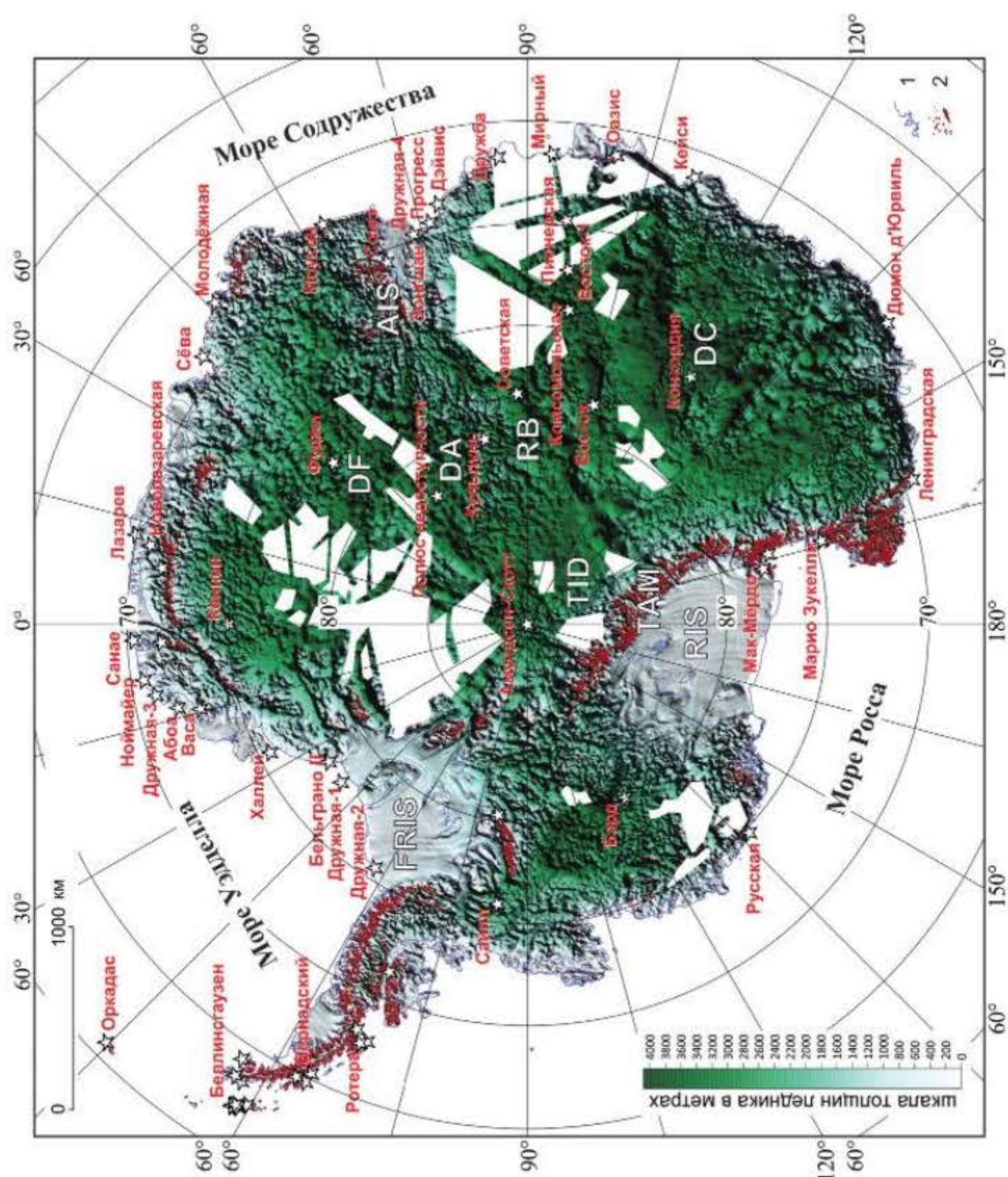


Рис. 1. Дневная поверхность Антарктиды и подледниковые водоёмы
 1 – шельфовые ледники по (ADD, 2016); 2 – изогипсы высот дневной поверхности по (ADD, 2016); сечение изолиний 250 м; 3 – береговая линия и границы шельфовых ледников по (ADD, 2016); 4 – выходы горных пород на поверхность ледника по (ADD, 2016); 5 – подледниковые водоёмы по (Попов и др., 2012; Wright, Siegert, 2012). Буквенные сокращения: AF – Африка; AIS – шельфовый ледник Эймери (Amery Ice Shelf); AO – Атлантический океан; AU – Австралия; DA – Купол Аргус (Dome Argus); DC – Купол Конкордия (Dome Concordia); DF – Купол Фуджи (Dome Fuji); FRIS – шельфовый ледник Фильхнера-Ронне (Filchner-Ronne Ice Shelf); IO – Индийский океан; PO – Тихий океан; RB – ледораздел Б (Ridge B); RIS – шельфовый ледник Росса (Ross Ice Shelf); SA – Южная Америка; SO – Южный океан; TAM – Трансантарктические горы (Transantarctic Mountains); TID – Купол Титан (Titan Dome)

ствуует Западно-антарктическому ледниковому покрову. Две других приурочены к Восточно-антарктическому ледниковому покрову и располагаются в районе куполов Фуджи и Конкордия. Границами между ними служат Трансантарктические горы и условная линия «горы Принс-Чарльз – горы Гамбурцева». Согласно самым современным представлениям, средняя мощность антарктического ледника составляет 1937 м при максимальном значении 4897 м. Общий объём льда,

Рис. 2. Мощность ледникового покрова Антарктиды
1 – береговая линия и линия налегания по (ADD, 2016); 2 – выходы горных пород на поверхность ледника по (ADD, 2016). Буквенные сокращения приведены в легенде к рис. 1



включая шельфовые ледники, оценивается в 26,92 млн км³, что соответствует $24,69 \times 10^{33}$ тонн. Если весь антарктический ледник растает, то уровень Мирового океана поднимется на 58 м (Fretwell et al., 2013).

Субгляциальная орография Антарктиды

Коренной рельеф, построенный по материалам проекта Bedmap2 (Fretwell et al., 2013), показан на рис. 3. На его основе составлена орографическая схема, являющаяся основой всех последующих геоморфологических и структурно-тектонических построений, поскольку определяет границы областей по внешним морфологическим признакам. Они также представлены на рис. 3. Для того чтобы составить подобную схему, необходимо определиться с системой районирования по высотному признаку. Для этого, в свою очередь, требуется выполнить статистическую обработку данных по высотам коренного рельефа всей нашей планеты. По результатам выполненного научного исследования построена уточнённая гипсографическая кривая (Попов, 2015), которая и была положена в основу районирования.

В конечном итоге, на орографической карте Антарктиды были выявлены области в соответствии со следующими градациями по высотному признаку сверху вниз: *средние горы* (2000÷3000 м), *низкие горы* (1000÷2000 м), *мелкосопочник, плоскогорья и холмогорья* (500÷1000 м), *холмистые возвышенности и равнины* (150÷500 м), *холмистые низменности и низменные равнины* (–300÷150 м), *погруженные равнины и погруженные холмы и гряды* (ниже –300 м). Отдельно вынесены: *котловины и желоба* (абсолютные высоты выше –300 м), *глубокие котловины и желоба* (абсолютные высоты ниже –300 м), *одиночные возвышенности* (абсолютные высоты до 500 м) и *одиночные подлёдные поднятия* (абсолютные высоты ниже уровня моря). Последние две градации приняты из-за затруднений при отнесении данных объектов к той или иной категории. Помимо абсолютных высотных отметок, они характеризуются значительными относительными высотами, округлой формой в плане и высотой склонов около 1000 м. В целом, терминология новых градаций не кажется автору особенно удачной, но лучшего, на сегодняшний день он предложить не может.

Границами орографических форм служат не высотные отметки, а структурные линии: бровки и тыловые швы, что обеспечивает естественное деление поверхности. Разумеется, всё не так просто и

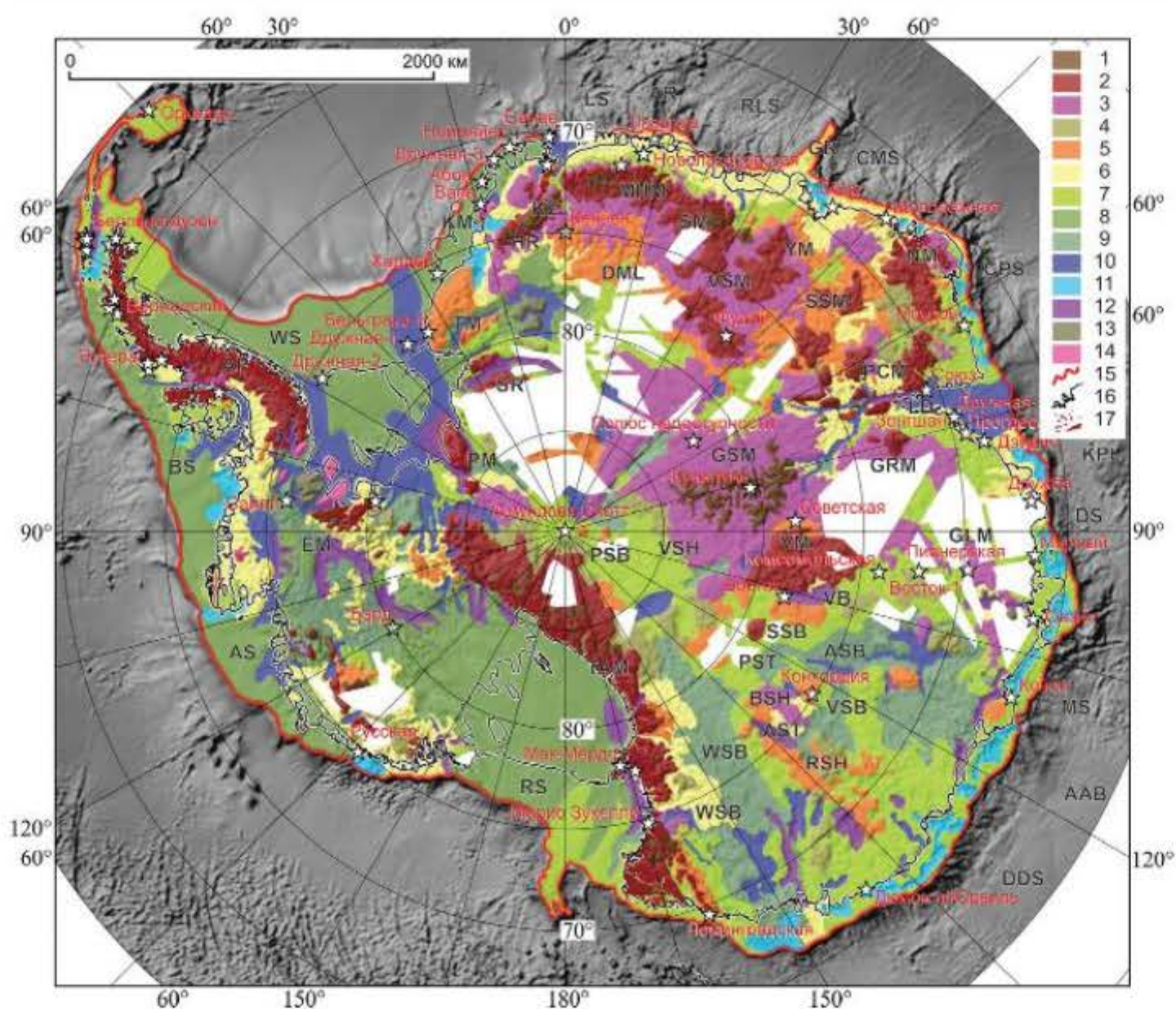


Рис. 3. Орографическая схема коренного рельефа Антарктиды

1 – средние горы; 2 – низкие горы; 3 – мелкосопочник; 4 – плоскогорья; 5 – возвышенности; 6 – холмистые низменности; 7 – низменные равнины; 8 – погруженные равнины; 9 – погруженные холмы и гряды; 10 – котловины и желоба; 11 – котловины и желоба шельфа; 12 – глубокие котловины и желоба; 13 – одиночные возвышенности; 14 – одиночные подлёдные поднятия; 15 – бровка шельфа; 16 – береговая линия и границы шельфовых ледников по (ADD, 2016); 17 – горные выходы по (ADD, 2016). Буквенные сокращения: AAB – Австрало-антарктическая котловина; AP – Антарктический полуостров; AR – хребет Астрид; AS – море Амундсена; AST – желоб Адвенчер; ASB – подлёдный бассейн Аврора; BS – море Беллинсгаузена; BSH – возвышенность Бельжика; CPS – море Содружества; CMS – море Космонавтов; DDS – море Дюрвиля; DS – море Дейвиса; DML – Земля Королевы Мод; EM – горы Элсуерта; GLM – горы Голицына; GR – хребет Гуннерус; GRM – горы Гров; GSM – подлёдные горы Гамбурцева; HR – хребет Хеймефронт; KE – горы Кирван; KM – горы Крауль; KPL – плато Кергелен; LD – жёлоб Ламберта; LS – море Лазарева; MHM – горы Мюлиг-Хофман; MS – море Моусона; NM – горы Нейпир; PCM – горы Принс-Чарльз; PM – горы Пенсакола; PSB – подлёдный бассейн Полярный; PSB – подлёдный бассейн Полярный; RLS – море Рисер-Ларсена; RS – море Росса; RSH – возвышенность Резольюшан; SM – горы Сёр-Роннане; SR – хребт Шеклтона; SSB – равнина Шмидта; SSM – подлёдные горы Серлапова; TAM – Трансантарктические горы; TM – горы Террон; VB – котловина Восток; VSB – котловина Винсенс; VSH – Восточная равнина; VSM – подлёдные горы Вернадского; WS – море Уэдделла; WSB – котловина Уилкса; YM – горы Ямато

однозначно. На обсуждаемой орографической карте (см. рис. 3) не предполагается явное выделение трёх классических составляющих форм рельефа: придонная часть, приповерхностная часть и склон (это сделало бы карту абсолютно нечитаемой). Таким образом, в соответствии с обычной практикой, полагалось, что границами положительных форм должны быть тыловые швы, а отрицательных – бровки. Однако соблюсти этот принцип не всегда представлялось возможным. Ещё в своих ранних работах А.Н. Ласточкин отмечал, что *«Первая из стоящих перед орографией трудность заключается в отсутствии способа строгого ограничения всех форм ЗП (земной поверхности – прим. автора) и единого критерия проведения их границ ... В.В. Пиготровскому ... в качестве ... границ пришлось принимать в первом случае линии подошвы и бровки, а во втором – чисто условные линии, проходящие по середине склонов»* (Ласточкин, 1991, с. 13). Автору пришлось поступать аналогичным образом.

Обратимся к орографической карте Антарктиды в новой редакции (см. рис. 3). *Низкие и средние горы* характеризуются наибольшей степенью вертикальной расчленённости. Их преимущественные абсолютные высоты превышают 800 м (с учётом склонов). Они развиты главным образом в тихоокеанском (Трансантарктические горы) и индоокеанском секторах Антарктиды. В районе побережья на Земле Королевы Мод отчётливо прослеживается дуга среднегорных массивов Хеймефронт, Кирванвегген, Мюлиг-Хофман, Сёр-Роннане и Ямато. На отдельных участках их высота превышает 2500 м. Они частично выходят на дневную поверхность из-под ледника. Далее на восток от Земли Эндерби до оазиса Вестфоль располагается обширная горная страна, практически полностью скрытая подо льдом и выходящая на поверхность вершинами гор Нейпир, Принс-Чарльз и Гров. К ним примыкает самый значительный по размерам массив подлёдных гор Гамбурцева, находящихся в центральной части Восточной Антарктиды. Наиболее протяжённая горная система Антарктиды – Трансантарктические горы, практически полностью возвышающиеся над поверхностью ледника. Для них характерны значительные высоты, превышающие 2100 м, и межгорные долины, глубиной более 300 м.

Возвышенности и плоскогорья характеризуются относительно слабой степенью вертикальной расчленённости и преимущественными высотами от 150 до 800 м (с учётом склонов). Они занимают значительную часть Восточной Антарктиды и территориально тяготеют к

горным массивам, являясь их логическим продолжением под ледниковым покровом.

Низменности и погруженные области – превалирующие орографические формы коренного рельефа Антарктиды, они представляют собой относительно слаборасчленённую поверхность абсолютной высотой от –700 до 150 м. *Котловины и желоба*, а также *глубокие котловины и желоба* являются достаточно распространёнными отрицательными формами коренного рельефа. Для них характерны не столько абсолютные, сколько значимые относительные высоты, порой превышающие 1000 м. Эти объекты располагаются, преимущественно, в районе разломов и рифтовых зон (рифтовая долина Ламберта, жёлоб Восток, подлёдный бассейн Аврора, обширная зона котловин и желобов в районе шельфового ледника Фильхнера–Ронне и пр.).

Донное таяние и подледниковые водоёмы Антарктиды

Как следует из представленных выше рисунков, в генеральном плане коренной рельеф Антарктиды характеризуется наличием двух зон, различающихся по протеканию основного рельефообразующего процесса. Верхний ярус представлен нунатаками, оазисами и горными массивами, т.е. свободной ото льда территорией, подвергающейся интенсивной эрозии, связанной с нивальными процессами. Подлёдная область в настоящее время испытывает изостатическое воздействие ледника. При этом, по всей видимости, для большей её части характерно донное таяние. Обратимся к математической модели И.А. Зотикова (Зотиков, 1961, 1963; Zotikov, 1963). В ней получено соотношение для критической толщины ледника T_{CR} (мощность ледника, при котором начинается донное таяние) в зависимости от скорости накопления осадков на его поверхности w_s , и температуры на глубине затухания сезонных колебаний t_s :

$$T_{CR} = \frac{2\lambda}{\Lambda_g \sqrt{2\pi}} (\theta_F - \theta_s) \sqrt{\frac{T w_s}{a}} \left[\operatorname{erf} \left(\sqrt{\frac{T w_s}{a}} \right) \right]^{-1}, \quad (1)$$

где $\operatorname{erf}(z)$ – функция ошибок Гаусса: $\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-x^2) dx$; λ – коэффициент теплопроводности льда, $\lambda = 2,1$ Вт/(м·°С); a – коэффициент температуропроводности льда, $a = 1,15 \cdot 10^{-6}$ м²/с (Патерсон, 1984); Λ_g – величина теплового потока. Температура плавления льда t_M при

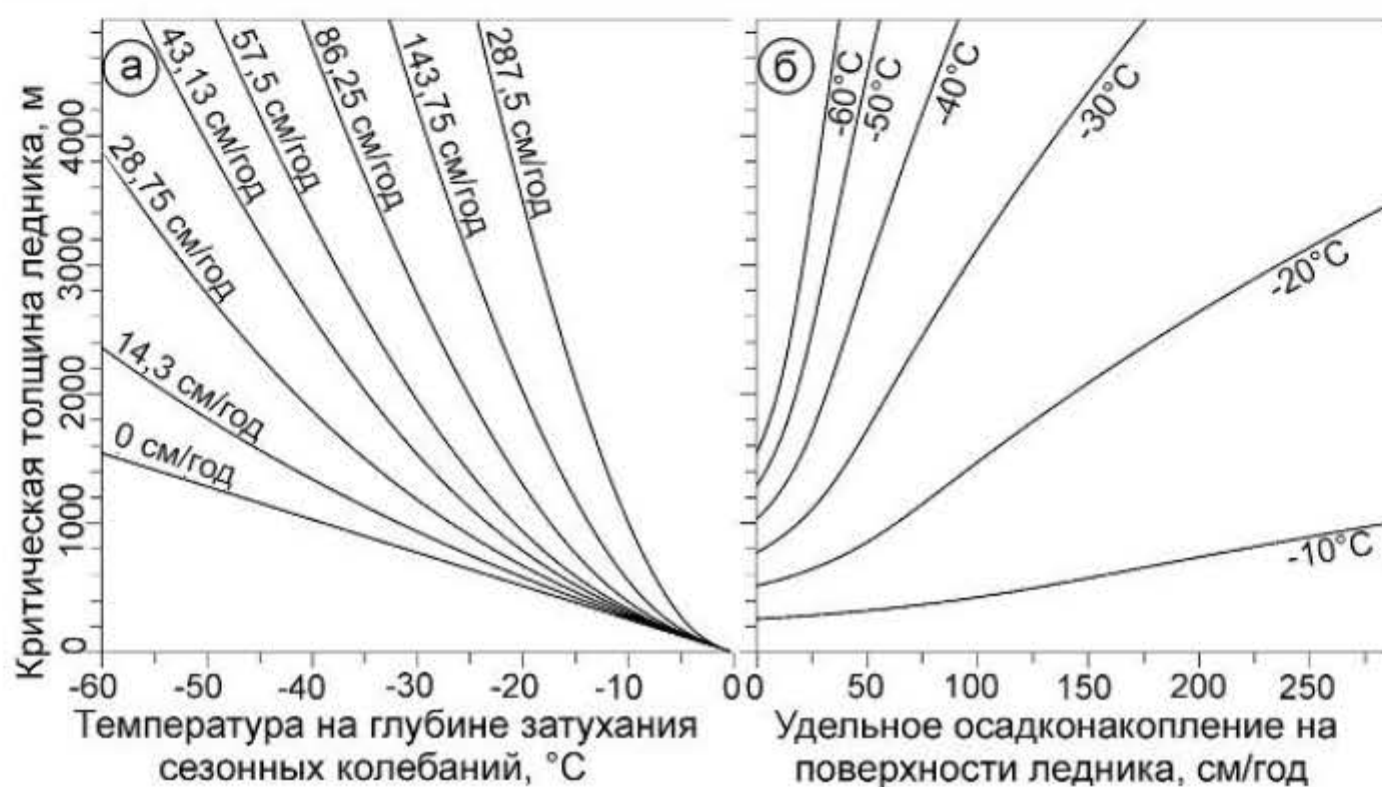


Рис. 4. Зависимость критической толщиной ледника от температуры на глубине затухания сезонных колебаний (а) и удельного осадконакопления (б). Расчёты производились для аккумуляции при плотности снега $0,32 \text{ г/см}^3$ и средней величине теплового потока на континентах $\Lambda_G = 56,5 \text{ мВт/м}^2$ (Аплонов, 2001)

его мощности T подчиняется соотношению $t_M = -T/1149$ (Патерсон, 1984). Графики зависимостей T_{CR} от температуры на глубине затухания сезонных колебаний и удельного осадконакопления, приведённого к плотности снега $0,32 \text{ г/см}^3$, показаны на рис. 4.

На рис. 5 приведена схема зон донного таяния при различных значениях величины теплового потока. В расчётах использовалась мощность ледника по данным проекта Bedmap2 (Fretwell et al., 2013), модельные данные по аккумуляции Антарктиды, заимствованные из работы (Van de Berg et al., 2006), и температура на глубине затухания сезонных колебаний из нового Атласа Антарктики (Атлас Океанов, 2005, с. 188). На этой же схеме нанесено положение известных подледниковых водоёмов. На сегодняшний день их обнаружено более четырёхсот, и озеро Восток выделяется среди них своими грандиозными размерами (Попов и др., 2012; Wright, Siegert, 2012). Из схемы (см. рис. 5), в частности, следует, что даже при величинах теплового потока, соответствующих средним значениям для континентов, донное таяние охватывает большую часть Антарктиды. Приведённые построения – лишь грубая оценка, призванная показать общую ситуацию. На самом деле этот вопрос намного сложнее, поскольку требует учёта особенностей глубинного строения континента.

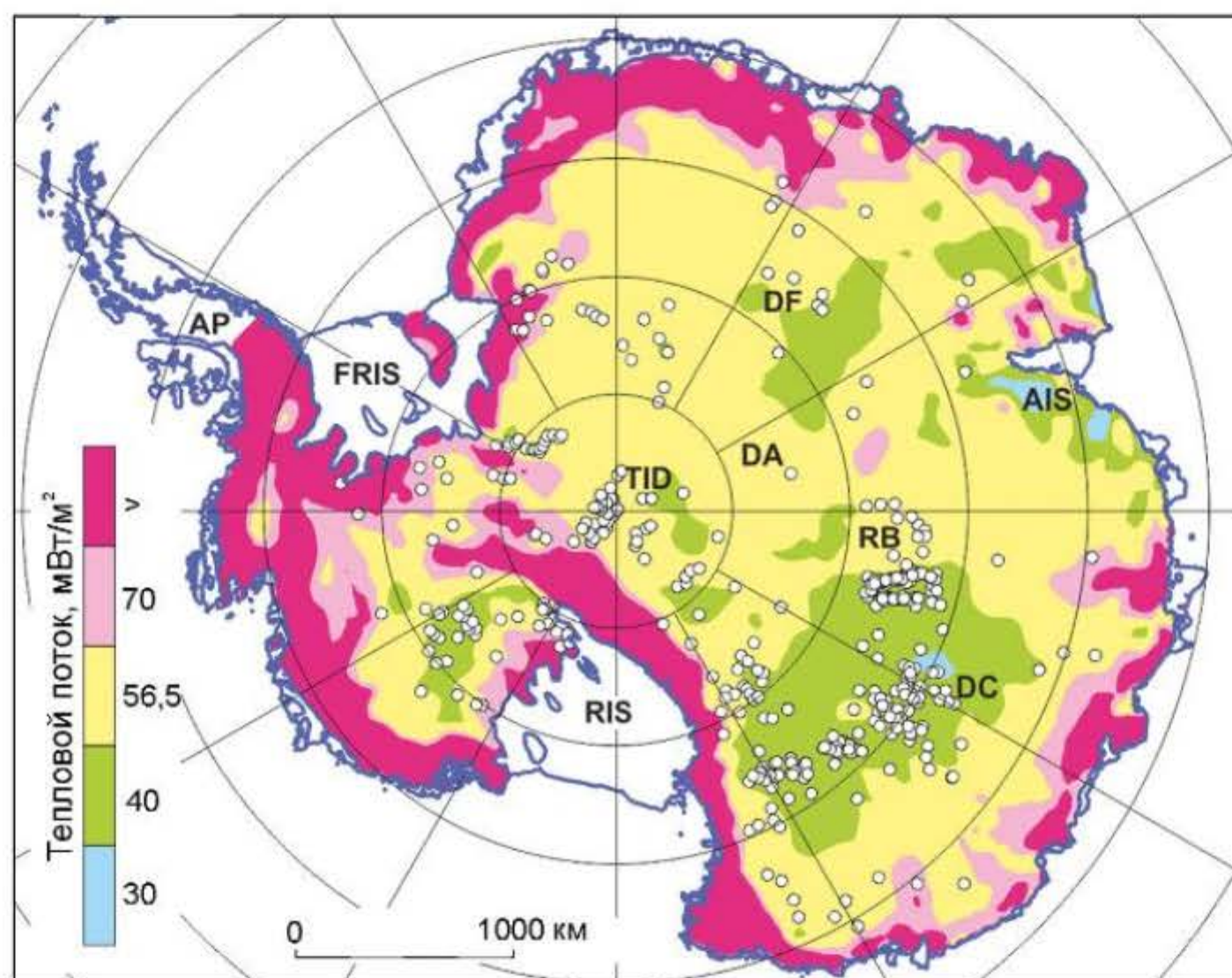


Рис. 5. Области донного таяния при различных значениях теплового потока согласно модели И.А. Зотикова (Зотиков, 1961, 1963; Zotikov, 1963) Белыми кружками показаны подледниковые водоёмы по (Попов и др., 2012; Wright, Siegert, 2012). Буквенные сокращения: AIS – шельфовый ледник Эймери; AP – Антарктический полуостров; DA – купол Аргус; DC – купол Конкордия; DF – купол Фуджи; FRIS – шельфовый ледник Фильхнера-Ронне; RB – ледораздел Б; RIS – шельфовый ледник Росса; TID – купол Титан

Наличие донного таяния, подтверждаемое существованием подледниковых водоёмов, указывает на то, что, вероятно, на подлёдной поверхности Антарктиды происходят интенсивные процессы водной эрозии. Этот вывод входит в некоторое противоречие с оценками, предложенными в работе (Cox et al., 2010), согласно которой скорость денудации во внутренних районах Антарктиды составляет $(1-2) \times 10^{-2}$ мм/год. Это чрезвычайно мало, если учесть, что, согласно обзору, представленному в (Попов, 2017а), скорость денудации в горных районах превышает эту величину на два порядка. Кроме того, исследования последних лет указывают на возможность катастрофических подледниковых паводков (Wingham et al., 2006; Popov et al., 2017; Боронина и др., 2019), в результате чего интенсивность эрозионных процессов многократно возрастает.

Заключение

Планомерное изучение Антарктиды насчитывает менее семидесяти лет, но за это время, особенно за два последних десятилетия, мы много узнали об этом континенте. Благодаря активному международному сотрудничеству получено достаточно обширное представление о подлёдном рельефе, строении ледника и характере его течения. Открыты такие уникальные объекты, как подледниковые водоёмы, а обнаружение самого большого из них, озера Восток, положило начало новому направлению в науке, *субгляциальной гидрологии*. Её задача заключается в понимании и описании процессов зарождения и развития подледниковой гидрологической сети в целом, и подледниковых водоёмов в частности. Кроме того, поскольку ведущая роль денудационных процессов связана именно с водной эрозией, то оно призвано также объяснять и описывать характер эволюции подлёдного рельефа.

С другой стороны, подлёдный рельеф Антарктиды ещё до конца не изучен. Ещё хватает «белых пятен», куда, в силу логистических сложностей, ещё не смогли долететь самолёты или дойти санно-гусеничные походы с геофизическими съёмками. Это дело будущего. В 2019 г. международным антарктическим сообществом под эгидой СКАР образована новая, третья генерация проекта Vedmar – Vedmar3. Он, так же как и два предыдущих, направлен на пополнение базы данных по мощности антарктического ледника и высотам подлёдного рельефа с последующим изданием соответствующих карт и цифровых моделей. Российская Федерация, аэрогеофизическими съёмками которой покрыто около 5,5 млн км² Антарктиды (Попов, Киселев, 2018), что составляет более трети её территории, принимала активное участие в первых двух генерациях, заслужив уважение в научном мире. Будем надеяться, что наша страна внесёт достойный вклад в проект Vedmar3, и сделает следующий шаг на пути понимания подлёдной топографии, и субгляциальных процессов Антарктиды.

Благодарности. Настоящее исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках проекта № 17-55-12003 ННИО.

Литература

- Аплонов С.В. Геодинамика. СПб.: Изд-во СПб. ун-та, 2001. 360 с.
Атлас Антарктики. Т. 1 / Ред. В.Г. Бакаев. М. – Л.: ГУГК, 1966. 238 с.
Атлас Антарктики. Т. 2 / Ред. Е.И. Толстиков. Л.: Гидрометеиздат, 1969. 598 с.

- Атлас океанов. Антарктика / Ред. В.И. Куроедов. Главное Управление навигации и океанографии Министерства обороны. СПб., 2005. 280 с.
- Беллинсгаузен Ф.Ф. Двукратные изыскания в Южном Ледовитом океане и плавание вокруг света в продолжение 1819, 20 и 21 годов. М.: Географгиз, 1949. 358 с.
- Боронина А.С., Четверова А.А., Попов С.В., Пряхина Г.В. Обзор потенциально прорывоопасных озёр и последствия прохождения их паводков в районах холмов Тала и Ларсеманн (Восточная Антарктида) // II Всерос. науч.-практич. конф. «Современные тенденции и перспективы развития гидрометеорологии в России», 5–7 июня 2019 г., Иркутск. С. 307–318.
- Зотилов И.А. О температурах в толще ледников Антарктиды // Антарктика. 1963. С. 61–105.
- Зотилов И.А. Тепловой режим ледника Центральной Антарктиды // Бюлл. Советской Антарктич. экспедиции. 1961. Вып. 28. С. 16–21.
- Ласточкин А.Н. Рельеф земной поверхности. Л.: «Недра», 1991. 340 с.
- Ласточкин А.Н., Попов С.В. Результаты и методика геоморфологического картографирования подледно-подводного рельефа впадины Ламберта и ее обрамления (Восточная Антарктида) // Геоморфология. 2002. № 2. С. 80–91.
- Патерсон У.С.Б. Физика ледников. Пер. с англ. М.: Мир, 19., 472 с.
- Попов С.В. Методика расчета линий тока земной поверхности, их использование в субляциальной геоморфологии и моделировании экзарационных процессов (на примере района Земли Принцессы Елизаветы, Восточная Антарктида) // Геоморфология. 2017а. № 1. С. 46–54. doi: 10.15356/0435-4281-2017-1-46-54.
- Попов С.В. Мир, скованный льдом // Вест. РФФИ. 2017б. № 4 (96). С. 78–89. doi: 10.22204/2410-4639-2017-096-04-78-89.
- Попов С.В., Киселев А.В. Отечественные аэрогеофизические исследования на землях Мак-Робертсона, Принцессы Елизаветы и Вильгельма II, Восточная Антарктида // Криосфера Земли. 2018. Т. XXII. № 1. С. 3–13. doi: 10.21782/KZ 1560-7496-2018-1(3-13).
- Попов С.В., Масолов В.Н., Лукин В.В., Попков А.М. Отечественные сейсмические, радиолокационные и сейсмологические исследования подледникового озера Восток // Лёд и Снег. 2012. Т. 52. № 4. С. 31–38. doi: 10.15356/2076-6734-2012-4-31-38.
- Попов С.В. Гипсографическая кривая подледно-подводной поверхности Земли // Геоморфология. 2015. № 4. С. 85–90. doi: 10.15356/0435-4281-2015-4-85-90.

- Antarctic Digital Database (ADD). Version 7. 2016. Scientific Committee on Antarctic Research, British Antarctic Survey, Cambridge, UK (<https://www.add.scar.org/home/add7>)
- Cox S.E., Thomson S.N., Reiners P.W., Hemming S.R., van de Flierdt T. Extremely low long-term erosion rates around the Gamburtsev Mountains in interior East Antarctica // *Geophys. Research Letters*. 2010. V. 37. P. 1–5. doi: 10.1029/2010GL045106.
- Fretwell P., Pritchard H.D., Vaughan D.G., Bamber J.L., Barrand N.E., Bell R., Bianchi C., Bingham R.G., Blankenship D.D., Casassa G., Catania G., Callens D., Conway H., Cook A.J., Corr H.F.J., Damaske D., Damm V., Ferraccioli F., Forsberg R., Fujita S., Gim Y., Gogineni P., Griggs J.A., Hindmarsh R.C.A., Holmlund P., Holt J.W., Jacobel R.W., Jenkins A., Jokat W., Jordan T., King E.C., Kohler J., Krabill W., Riger-Kusk M., Langley K.A., Leitchenkov G., Leuschen C., Luyendyk B.P., Matsuoka K., Mouginot J., Nitsche F.O., Nogi Y., Nost O.A., Popov S.V., Rignot E., Rippin D.M., Rivera A., Roberts J., Ross N., Siegert M.J., Smith A.M., Steinhage D., Studinger M., Sun B., Tinto B.K., Welch B.C., Wilson D., Young D.A., Xiangbin C., Zirizzotti A. Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica // *The Cryosphere*. 2013. V. 7. P. 375–393. doi: 10.5194/tc-7-375-2013.
- Popov S.V., Pryakhin S.S., Bliakharskii D.P., Pryakhina G.V., Tyurin S.V. Vast ice depression in Dalk Glacier, East Antarctica // *Ice and Snow*. 2017. V. 57. № 3. P. 427–432. doi: 10.15356/2076-6734-2017-3-427-432.
- Van de Berg W.J., Van den Broeke M.R., Reijmer C.H., Van Meijgaard E. Re-assessment of the Antarctic surface mass balance using calibrated output of a regional atmospheric climate model / *Journ. of Geophys. Research*. 2006. V. 111. P. D11104. doi: 10.1029/2005JD006495.
- Williams R.S. Jr., Ferrigno J.G. (eds.) Satellite image atlas of glaciers of the world. State of the Earth's cryosphere at the beginning of the 21st century – Glaciers. U.S. Geological Survey Professional Paper 1386–A–2. 2012. 254 p.
- Wingham D.J., Siegert M.J., Shepherd A., Muir A.S. Rapid discharge connects Antarctic subglacial lakes // *Nature*. 2006. V. 440. № 7087. P. 1033–1036. doi: 10.1038/nature04660.
- Wright A., Siegert M.J. A fourth inventory of Antarctic subglacial lakes. // *Antarctic Science*. 2012. V. 24. № 6. P. 659–664. doi: 10.1017/S095410201200048X.
- Zotikov I.A. Bottom melting in the central zone of the ice shield on the Antarctic continent and its influence upon the present balance of the ice mass // *Bull. Intern. Assoc. Scient. Hydrol*. 1963. V. 8. № 1. P. 36–44.