
УДК 550.4

С.Е. Шнюков

Киевский национальный университет имени Тараса Шевченко

ПРОЕКТ ГЛОБАЛЬНОГО ГЕОЛОГИЧЕСКОГО ИССЛЕДОВАНИЯ ПОДЛЕДНИКОВОЙ АНТАРКТИДЫ: РЕЗУЛЬТАТЫ РЕАЛИЗАЦИИ И ВОЗМОЖНОЕ ДАЛЬНЕЙШЕЕ РАЗВИТИЕ

Покупайте землю, ее больше не производят!

Семюэл Клеменс (Марк Твен)

Традиционные методы неприменимы для изучения подледниковых геологических образований Антарктиды. Показано, что регионально обобщенные результаты могут быть получены на основе геохимического исследования единичных зерен САМ («сквозные» акцессорные минералы: циркон, монацит и др.) больших детритовых популяций из ледниковых отложений, которые объективно отражают состав, возраст и объемные соотношения пород в пределах дренируемой ледосборным бассейном территории (блока коры). В предварительной апробации использованы данные по детритовым популяциям циркона и монацита, которые характеризуют два тестовых региона, сложенных контрастными по возрасту и составу образованиями: (1) «молодой» Антарктический полуостров, Западная Антарктида (АР) и (2) «древний» Украинский щит с сопредельной частью Восточно-Европейской платформы (ЕЕР). Последний имитировал докембрийский щит Восточной Антарктиды. Концентрации микроэлементов в единичных зернах минералов определены специальным вариантом рентген-флуоресцентного метода — milliprobe XRF (XRF-MP/SG). Оценки возраста зерен получены методом «общего свинца». Состав материнских для циркона пород определен при помощи ранее предложенной дискриминантной диаграммы $Hf - Y$.

Полученные результаты дополняют современные данные о коровой эволюции в пределах тестовых регионов. Они трансформированы в региональные модели роста континентальной коры. Последние комплексуются с геохимическими моделями магматических систем этапов активизации коры на примере Коростенского плутона (ЕЕР) и вулкана острова Десеппен (АР). Разработаны процедуры для эффективного взаимного контроля надежности, согласования и объединения геохимических моделей обоих типов. Охарактеризованный подход был базовым для проекта IPY 2007/2008 «Circum Antarctic Zircon Census» (CAZIC), а сейчас предлагается для его дальнейшего перспективного развития в Антарктиде, а также для исследования других континентов с целью глобального ретроспективного мониторинга эволюции континентальной коры Земли.

© С.Е. ШНЮКОВ, 2013

Введение

Антарктида представляет собой уникальный континент, в геологическом отношении наименее изученный среди всех материков Земли. Причины такого положения известны. Прежде всего, это наличие мощного ледникового панциря, который полностью исключает применение прямых методов исследования для преобладающей части территории, сложные климатические условия и почти полная ненаселенность. Между тем, геологические исследования в Антарктиде чрезвычайно интересны не только для развития фундаментальных представлений о геологической эволюции планеты (что очевидно), но и с точки зрения оценки потенциальных минерально-сырьевых ресурсов этого последнего не разделенного между государствами континента Земли. Их масштабы по существующим априорным оценкам (рис. 1) различны для разных секторов континента и в целом весьма значительны, особенно по таким приоритетным для экономики ведущих стран мира видам минерального сырья, как алмазы, уран, редкие металлы и углеводороды. Подчеркнем, что существующие оценки из-за крайне незначительной геологической изученности континента основываются в основном на аналогиях с другими, хорошо исследованными регионами. Представляется, что для континента в целом они порядково верны, однако для разных его секторов во многом малодостоверны. Более того, при сохранении существующей технологии получения геологической информации, основывающейся на геофизических методах и немногочисленных прямых наблюдениях в пределах редких обнаженных участков (~5 % площади континента), а ее придерживаются все страны, ведущие геологические исследования в Антарктиде, нельзя ожидать существенного повышения достоверности оценок и в обозримом будущем.

Однако, особенно учитывая ограниченность срока действия «Договора об Антарктиде» 1959 г. (заканчивается в 2048 г.) и уже достаточно давно обсуждаемые претензии многих государств на различные секторы континента (<http://planetolog.ru/map-continent-big.php?id=ANT&scheme=3>), необходимость в существенном повышении уровня как общей геологической изученности Антарктиды, так и достоверности оценок ее минерально-сырьевого потенциала, весьма велика. Востребованность таких данных со временем будет только возрастать, поскольку все страны, имеющие «антарктические» амбиции, желают осуществлять планирование своей перспективной, стратегической политики в отношении Антарктиды на основе, естественно, самой достоверной информации о ее геологическом строении и важнейших минерально-сырьевых ресурсах.

Таким образом, существует большой и неудовлетворенный спрос на информацию, которую с полным правом можно считать стратегической. В то же время существует и серьезная проблема в ее получении. Имеющиеся исследовательские методы решить эту проблему (во всяком случае полностью) не могут. Следовательно, решение проблемы возможно лишь на основе новых, нетрадиционных исследовательских подходов (и соответствующих технологий), допускающих относительно простую, дешевую и экспрессную реализацию. Краткая презентация одного из них и приведена в настоящей статье. По мнению автора, приведенные выше соображения не оставляют сомнений в ее актуальности.

Цель работы — краткая презентация проекта CAZIC («Circum Antarctic Zircon Census») — «Циркумпольярное исследование цирконов из ледниковых отложений

Антарктики») и результатов его частичной реализации в рамках программы III Международного Полярного Года (III МПГ — IPY 2007/2008), а также обоснование перспектив дальнейшего использования примененного в этом проекте исследовательского подхода для решения охарактеризованной выше проблемы.

Особенности Антарктиды как объекта геологического изучения

Начало прямого геологического изучения континентальной Антарктиды принято датировать 1895 г. (до этого редкие, случайные наблюдения были ограничены островами Западной Антарктики и айсберговым обломочным материалом) [14]. Хотя первая половина XX века и ознаменовалась организацией целого ряда крупных комплексных (в т.ч. геологических) экспедиций (Норвегия, Швеция, Великобритания, Германия, Австралия и США), принесших весьма существенные результаты (например, уже тогда были установлены принципиальные различия между докембрийской восточной и фанерозойской западной частями континента), широкие и систематические исследования начались лишь в 1957 г. в рамках Международного геофизического года (МГГ 1957/1958) [14]. Они интенсивно продолжаются по настоящее время, а их международный статус гарантируется «Договором об Антарктиде» (1959 г.).

За эти годы был выполнен огромный объем геологических (изучена большая часть обнаженных районов, выполнено геологическое картирование различного масштаба) и геофизических (в первую очередь сейсморазведочных) исследований, особенно важных для центральных (подледниковых) районов континента. Изучение континентальной части Антарктиды сопровождалось исследованием островов Антарктики, континентального шельфа и дна прилегающих морей. Результаты этих исследований обобщены в многочисленных публикациях [4, 6—11, 13, 19, 37, 38, и др.], а в упрощенном, схематическом виде представлены на рис. 2 и 3. Не останавливаясь на деталях, обратим внимание на: (1) ограниченность имеющихся данных прямых наблюдений, (2) гипотетичность и дискуссионность всех геологических построений для центральных частей континента, (3) точечный характер геохронологических данных и их немногочисленность, (4) очевидную длительность и полиэтапность развития не только фанерозойской Западной, но и докембрийской Восточной Антарктиды, которые изучены явно недостаточно. Эти недостатки имеющихся данных во многом определяют и обсужденную выше низкую надежность существующих (рис. 1) оценок минерально-сырьевого потенциала континента и Антарктики в целом.

Наличие мощного ледникового панциря — главная причина того, что за более чем пятидесятилетний период интенсивных и систематических исследований многих, в т.ч. и ведущих стран мира были получены охарактеризованные выше относительно скромные результаты. В настоящее время он хорошо изучен — его рельеф, мощность и, главное, движение доступны для инструментального мониторинга (рис. 4, а, б, в, г), что позволяет кратко сформулировать очевидные, но принципиально важные для настоящей статьи положения:

1. Ледниковый покров Антарктиды покрывает фактически весь континент (~95 % его площади) (рис. 3 и 4).

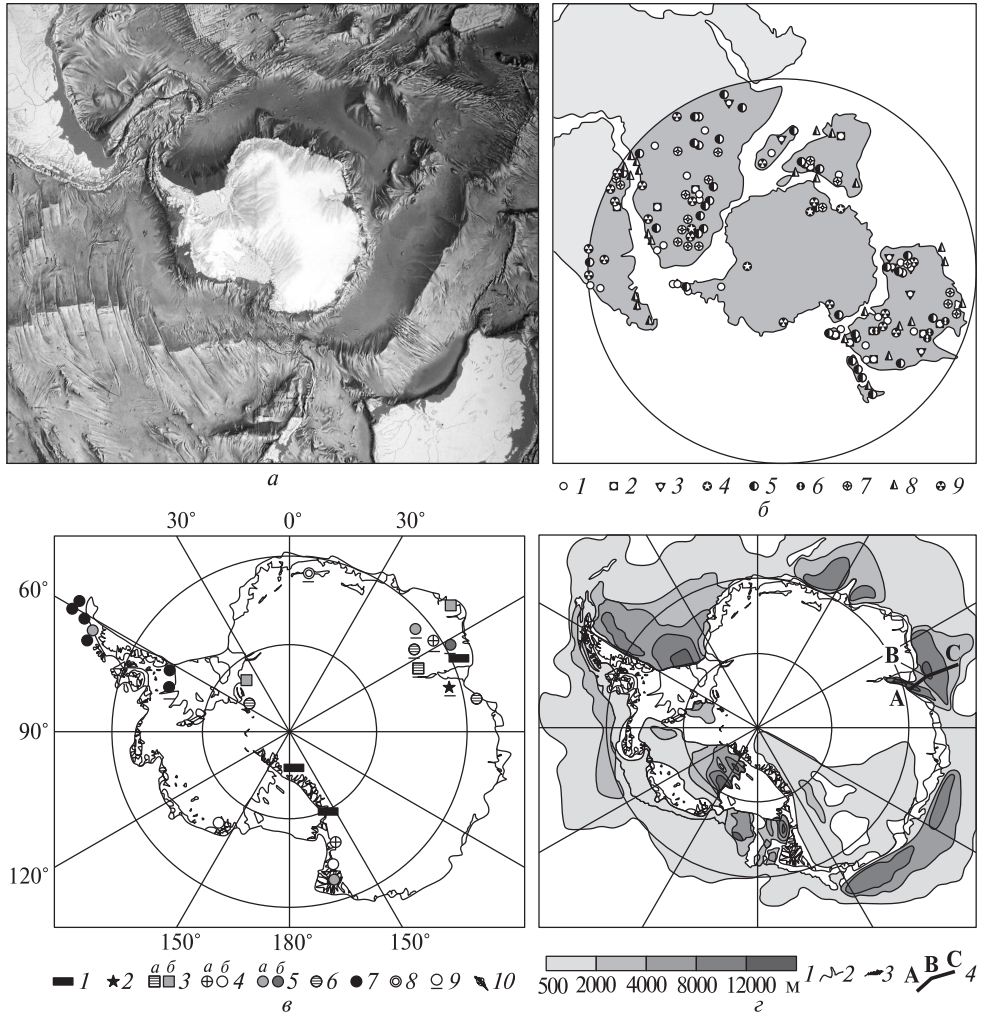


Рис. 1. Априорная оценка минерально-сырьевого потенциала Антарктиды (а, б) и один из примеров ее современного приближения к реальности (в, з): а — позиция Антарктиды в глобальной рифтовой системе Земли (<http://planetolog.ru/map-ocean-zoom.php?ocean=AR&id=1>); б — стандартные «гондванские» минерагенические построения [9, 38] (1 — медь; 2 — свинец/цинк; 3 — никель; 4 — платина; 5 — золото; 6 — серебро; 7 — алмазы; 8 — нефть/газ; 9 — уран); в — главные из уже обнаруженных проявлений твердых полезных ископаемых [9] (1 — каменный уголь; 2 — алмазы; 3 — железо; 4 — радиоактивные элементы; 5 — золото; 6 — платиноиды; 7 — комплекс: медь, полиметаллы, молибден, олово, золото и серебро; 8 — берилл в пегматитах; 9 — проявления, обнаруженные и/или изученные российскими геологами [9]; 10 — малодоступные горные районы); з — потенциальные нефтегазоносные бассейны Антарктики (1 — шкала мощности осадочного чехла; 2 — изобата 1000 м; 3 — горные районы с надледными выходами коренных пород; 4 — комплементарный геолого-геофизический разрез — см. работу [9])

2. Его масса распределена между ледосборными бассейнами различного ранга (важнейшие из них показаны на рис. 4, в). Границы ледосборных бассейнов определяются подледниковым рельефом и могут быть достаточно точно установлены.

3. Покров находится в постоянном движении от центра континента к его периферии, причем скорость перемещения ледовых масс возрастает в этом же

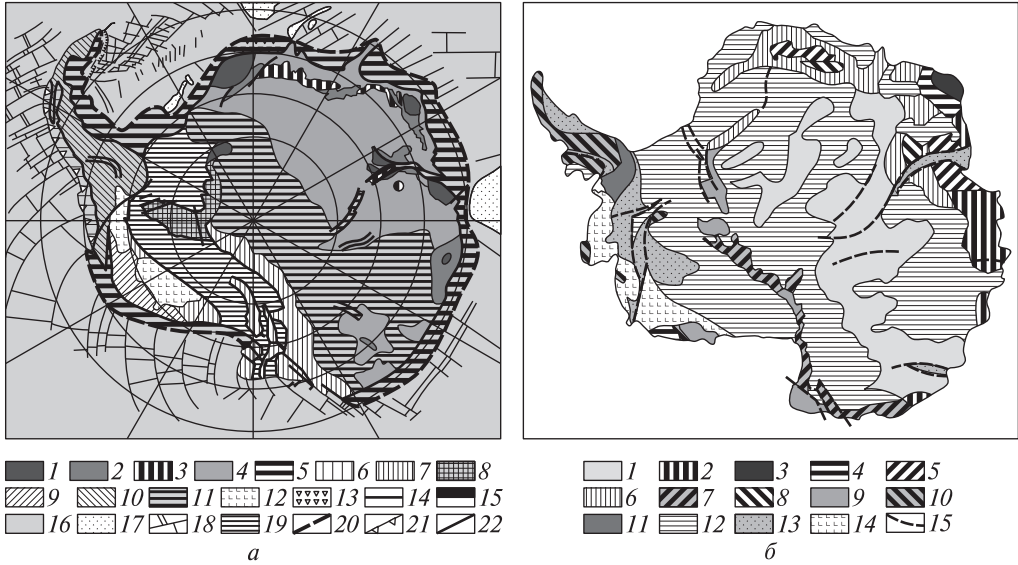
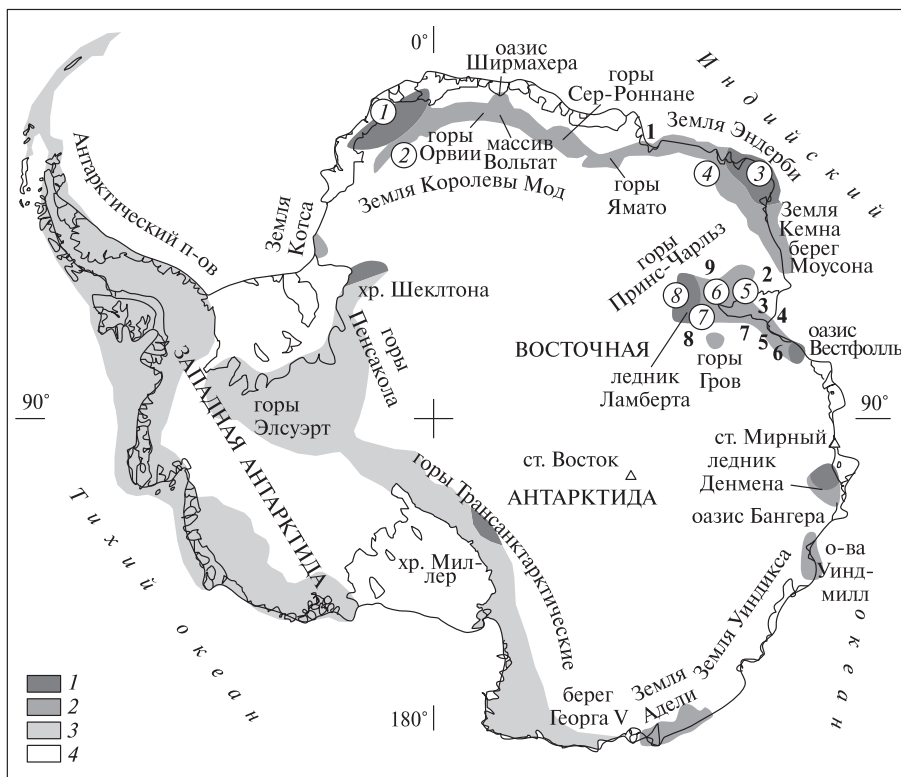
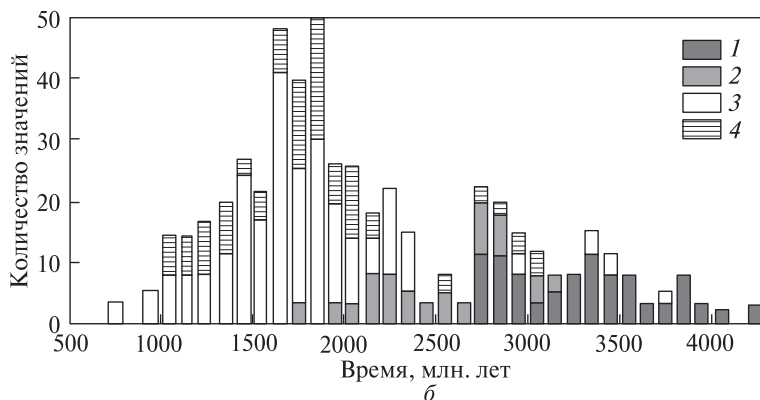


Рис. 2. Примеры разных вариантов современного геолого-структурного районирования Антарктиды по данным, соответственно, [9 и 37, полное цитирование в незначительной редакции автора]: *а* — Схема тектонического районирования Антарктики. 1–5 — древняя Восточно-Антарктическая платформа — ДВАП (1 — раннедокембрийские протократоны (гранулит-гнейсовые и гранит-зеленокаменные области); 2 — протерозойские подвижные пояса; 3 — зоны позднепротерозойско-раннепалеозойского тектонизма; 4 — недифференцированный докембрийский фундамент под ледовым покровом; 5 — недифференцированные платформенные чехлы под ледовым покровом; 6–12 — фанерозойский Западно-Антарктический подвижный пояс — ФЗАПП: 6 — выступ докембрийского фундамента; 7 — раннепалеозойская (росская) складчатая система; 8 — раннемезозойская (элсуэртская) складчатая система; 9 — палеозойско-мезозойская (амундсенская) складчатая система (Антарктанды); 10 — мезозойско-кайнозойская складчатая система (Антарктанды); 11 — позднекайнозойский преддуговой бассейн; 12 — кайнозойская вулканическая провинция; 13 — вулканические комплексы на континентальной окраине; 14 — внутриконтинентальные рифты; 15 — окраинные рифты; 16 — океанические впадины; 17 — океанические поднятия (срединные хребты и др.); 18 — трансформные разломы; 19 — оси палеоспрединга; 20 — граница континент-океан на дивергентной окраине; 21 — главные тектонические нарушения; 22 — граница континент-океан на палеоконвергентной окраине); *б* — складчатые комплексы (все оценки возраста с точки зрения автора пока очень приблизительны) (1–11): 1 — предполагаемы докембрийские подледные возвышенности; 2 — недифференцированные архейские комплексы пород; 3 — реликты «эндербитовой» протокоры, сформированной около 4 млрд лет назад (Нейпирская орогения); 4 — сформированные на ранней стадии метаморфизма и гранитизации (3,5 млрд лет, Рейнерская орогения); 5 — последующая стадия метаморфизма и гранитизации (3,0 млрд лет, Гумбольдская орогения), 6 — кульминационная стадия метаморфизма и гранитизации 2,6 млрд лет, Инзельская орогения); 7 — недифференцированные образования раннего докембрия, переработанные в инфраструктуре Росской геосинклинали; 8 — недифференцированные протерозойско-раннепалеозойские комплексы миогеосинклинального типа, деформированные и метаморфизованные на рубежах 1,8–1,7, 1,0 и 0,5 млрд лет (Рукерская и Росская орогения); 9 — недифференцированные верхне- и палеозойские толщи, деформированные на рубеже 0,65–0,45 млрд лет (Росская орогения); 10 — недифференцированные докембрийские-нижнепалеозойские образования, переработанные в инфраструктуре тихоокеанских геосинклинали; 11 — средне(?)-верхнепалеозойские толщи, преобразованные на этапе 0,2 млрд лет (Гондванская орогения); 12 — недифференцированные образования платформенного чехла; 13 — недифференцированные мезозойские и кайнозойские молассы; 14 — кайнозойские вулканиды; 15 — главные (дизъюнктивные?) линейменты



а



б

Рис. 3. Обобщение существующей информации по этапам развития Антарктиды в докембрии: *а* — тектоническое районирование Антарктиды на основе данных по обнаженным участкам [11]: (1 — архейские протокрытоны, 2 — протерозойский полициклический подвижный пояс, 3 — фанерозойский подвижный пояс Западной Антарктиды и Трансантарктических гор, 4 — территории, перекрытые сплошным ледниковым покровом); цифрами на схеме обозначены: 1 — залив Лютцов-Хольм, 2 — Земля Мак-Робертсона, 3 — шельфовый ледник Эймери, 4 — залив Прюде, 5 — оазис Ларсеманн, 6 — острова Реутер, 7 — Земля принцессы Елизаветы, 8 — уступ Моусона, 9 — г. Меридит; цифры в кругах обозначают: 1 — кратон Грюнехогна, 2 — область Мод, 3 — Нейпирская область, 4 — Рейнерская область, 5 — Биверская область, 6 — Фишерская область, 7 — Ламбертская область, 8 — Рукерская область; *б* — гистограмма модельных возрастов T_{DM} [13] (1 — архейские протокрытоны, 2 — области палеопротерозойского тектогенеза, 3 — области мезопротерозойского тектогенеза, 4 — Российская складчатая система Трансантарктических гор, включая хребет Миллер) (см. окончание на с. 16)

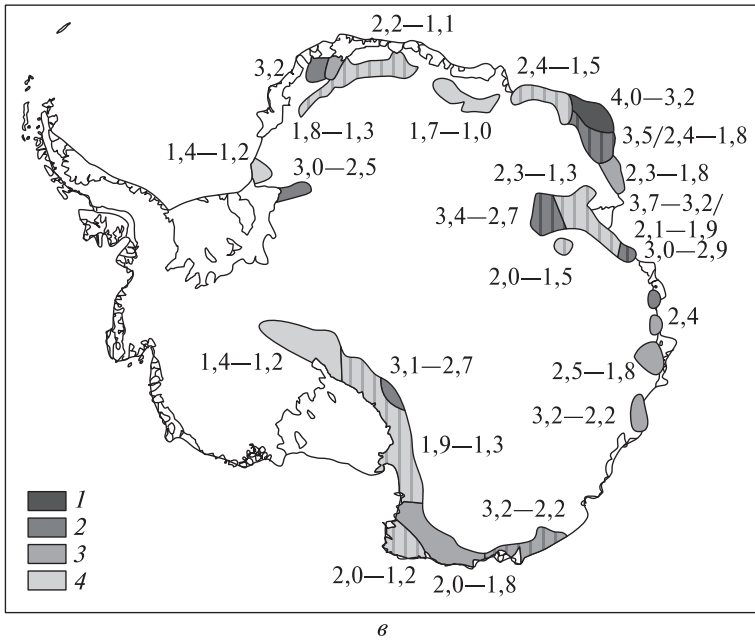


Рис. 3. Обобщение существующей информации по этапам развития Антарктиды в докембри: *в* — районирование земной коры Восточной Антарктиды по времени отделения первичного вещества коры от мантии (T_{DM}) [13]: 1–4 — интервалы модельного Sm–Nd возраста TDM, млрд. лет (1 — >3,2; 2 — 3,2–2,5; 3 — 2,5–1,6; 4 — 1,6–1,0); вертикальная штриховка соответствует районам с T_{DM} из разных диапазонов

генеральном направлении (рис. 4, б); направление движения льда в пределах ледосборных бассейнов показано на рис. 4, в.

4. Разгрузка ледосборных бассейнов происходит на побережье, часто в форме типичных выводных ледников (рис. 4, г).

5. Перемещение ледовых масс сопровождается мощной экзарационной деятельностью в контуре каждого ледосборного бассейна, который (подобно водосборным бассейнам крупных речных систем) выступает в роли мощного поставщика продуктов дезинтеграции подледниковых геологических образований, создавая в области разгрузки весьма представительную по отношению к ним «среднюю пробу» (ледниковые отложения).

Такой эффект «природного опробования» больших территорий (5), впервые использованный более 80 лет назад еще В.М. Гольдшмидтом для оценки кларков верхней континентальной земной коры и ставший впоследствии одним из самых эффективных средств для подобных операций, в нашем случае позволяет хотя бы частично превратить ледниковый покров из препятствия в инструмент для получения информации о подледниковых геологических образованиях Антарктиды. Действительно, действующая длительное время система главных ледосборных бассейнов континента (рис. 4, в) продуцирует такие «средние пробы» (ледниковые отложения) для целой системы «ячеек» («секторов»), покрывающих фактически всю территорию Антарктиды. Типичным примером является самый крупный на планете выводной ледник Ламберта и соответствующий ему ледосборный бассейн (рис. 4, в). Заметим, что при необходимости «природное опробование»

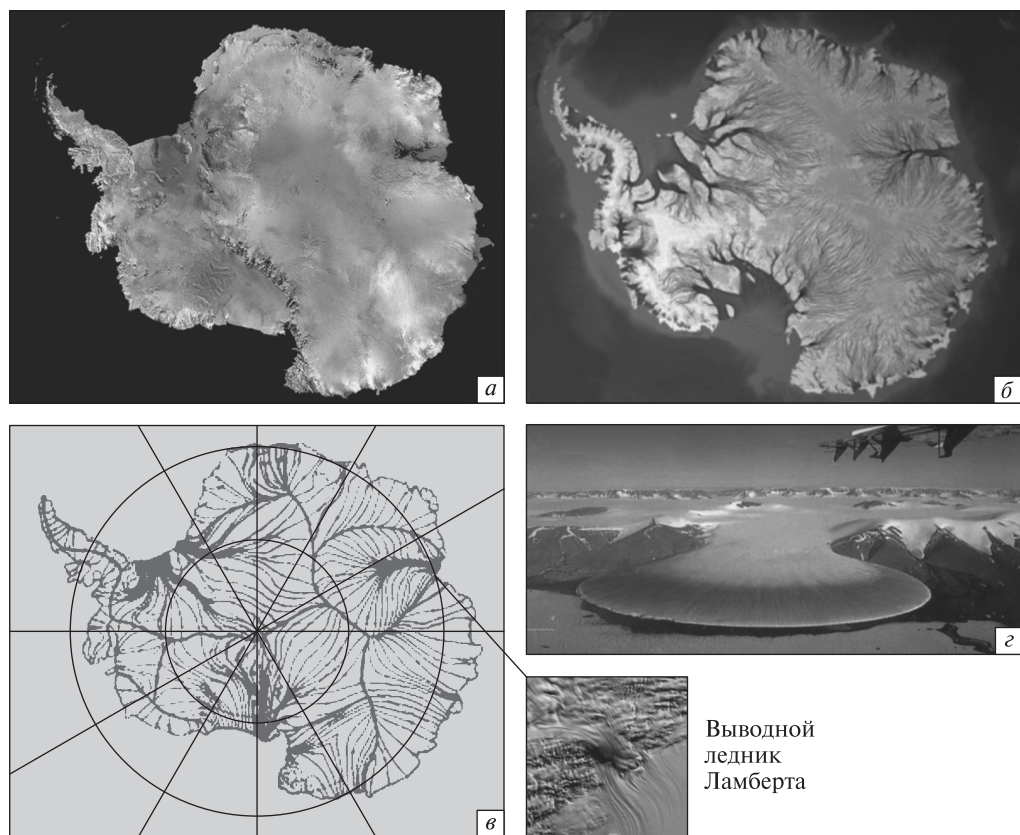


Рис. 4. Дренаж подледниковых геологических образований Антарктиды ледниковыми системами: *a* — вид поверхности Антарктиды из космоса (коллаж снимков NASA); *б* — относительная скорость движения ледников из центральных областей материка к побережью (данные NASA, оригинальная цветная анимация: <http://1.usa.gov/poJq1P>), цветовая шкала: белый — серый — темно серый (в оригинальном варианте желтый — зеленый — синий — пурпурный) соответствует возрастанию скорости движения от фактически нуля до нескольких м/год; *в* — главные ледосборные бассейны Антарктиды и направление движения льда в их пределах; *г* — типичный выводной ледник как форма разгрузки ледосборного бассейна и продуктов экзарации подстилающих (подледниковых) геологических образований, фото BAS (British Antarctic Survey)

допускает детализацию за счет перехода к ледосборным бассейнам более высоких порядков. Очевидно, что следующая задача состоит в максимально полной расшифровке информации о подледниковых образованиях, которую несут в себе такие «средние пробы» (ледниковые отложения).

Проект CAZIC

Охарактеризованная информация, получить которую можно относительно дешево и экспрессно (используя отбираемые пробы ледниковых отложений или сформированных за их счет донных осадков шельфа), по достоверности сравнима с результатами прямых геологических исследований, крайне дорогих, а чаще вообще невозможных в условиях Антарктиды. Вся трудность

заключается в том, что она не поддается полному, а главное, надежному «прочтению» при помощи традиционных методов изучения терригенных осадков. Однако весьма перспективен для решения этой важной задачи универсальный подход, целенаправленно разрабатываемый нами начиная с 80-х годов прошлого века [1, 3, 5, 16—18, 21—26, 28, 31—33, 41—44].

Он основывается на существовании связи распределения индикаторных элементов-примесей в наиболее распространённых, «сквозных» акцессорных минералах (САМ: циркон, монацит, апатит, сфен и др.) с условиями их кристаллизации, составом, генезисом, формационной принадлежностью и возрастом вмещающих горных пород и руд. Такая связь обоснована теоретически и подтверждена эмпирически на примере исследования обширных эталонных коллекций. Проведенные исследования показали возможность корректного решения обратной задачи, которая для эндогенных образований состоит в реставрации условий кристаллизации парагенезисов акцессорных минералов, а для осадочных образований типа ледниковых отложений Антарктиды — в установлении источников сноса (материнских горных пород и руд) детритовых САМ. В обоих случаях возможна оценка возраста методом «общего свинца»(циркон, монацит) [1 и др.].

В нашем случае для оценки становятся доступными следующие характеристики подледниковых районов, соответствующих дренирующим ледосборным бассейнам: 1) набор типов эндогенных горных пород (петротипов), преимущественно слагающих его площадь; 2) относительная распространённость различных петротипов; 3) их возраст; 4) наличие потенциально рудоносных геологических объектов и их распространённость с дифференциацией по типам оруденения. Такой универсальный подход и был принят в качестве базового для рассматриваемого проекта.

Проект CAZIC («Circum Antarctic Zircon Census» — «Циркумполярное исследование цирконов из ледниковых отложений Антарктики») был принят Международным Программным Комитетом III Международного Полярного Года (IPY 2007/2008 International Programme Office, Full Proposal # 301 as part of IPY Project # 77 «Plate Tectonics and Polar Gateways in Earth History») 15.03.2006 г.

Цель проекта. Определение состава и возраста ведущих типов горных пород, которые слагают дренируемые ледниковыми системами участки континента, а также установление главных этапов развития земной коры и важнейших минерогенических событий в пределах таких участков. Для этого использованы геохимические исследования единичных зерен САМ («сквозные» акцессорные минералы: циркон, монацит и др.) больших детритовых популяций из ледниковых отложений, которые объективно отражают состав, возраст и объёмные соотношения пород в пределах дренируемой ледосборным бассейном территории (блока коры).

Для достижения этой цели предполагалось выполнить:

1. Циркумполярные полевые исследования для отбора 40—60 репрезентативных проб ледниковых отложений, которые характеризуют подледниковые геологические образования в пределах главных ледосборных бассейнов Антарктиды.

2. Полевые исследования в пределах отдельных участков континента и прилегающих вулканических островов для изучения типичных магматических комплексов этапов активизации коры и представительного опробования их ведущих петротипов.



Рис. 5. Общая схема реализации комплексного петролого-геохимического моделирования эволюции земной коры и магматических систем с оценкой их рудогенерирующего потенциала для подледниковых регионов Антарктиды

3. Лабораторное исследование всех отобранных проб с выделением САМ, их микроскопическое и аналитическое изучение с определением концентраций индикаторных элементов-примесей в представительных выборках единичных зерен минералов ($n \cdot 1000$ анализов) при помощи специального варианта рентген-флуоресцентного метода — milliprobe XRF (XRF MP/SG) [2, 20, и др.], петрографическое и аналитическое изучение проб магматических пород.

4. Оценку возраста изученных единичных зерен циркона и монацита наиболее простым и экспрессным методом «общего свинца».

5. Идентификацию распространенных в пределах ледосборных бассейнов типов материнских горных пород по примесному составу САМ.

Полученные данные по геохимии САМ планировалось дополнить результатами исследования их Lu-Nf, Sm-Nd и U-Th-Pb систем для части образцов в рамках международного сотрудничества. На заключительном этапе Проекта предполагалось использовать все полученные данные для геохимического моделирования эволюции земной коры каждого из исследованных регионов Антарктиды и соответствующих магматических систем с последующим обобщением результатов моделирования для всего континента в целом.

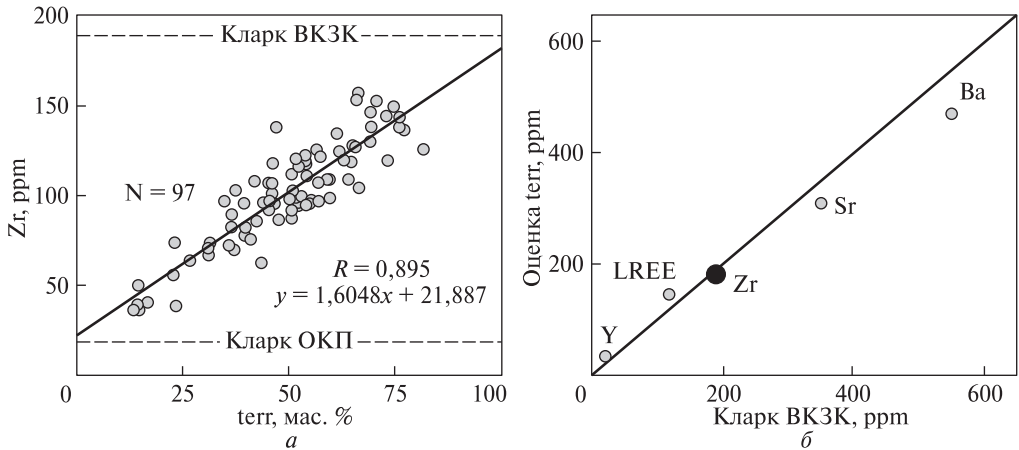


Рис. 6. Пример [25, 26 и др.] представительности терригенного стока рек относительно дренируемых участков континента, демонстрирующий правомерность использования больших популяций зерен терригенного циркона для объективного выделения основных этапов формирования крупных блоков земной коры, корректной количественной оценки интенсивности их проявления, петрологического содержания и металлогенической (минерагенической) нагрузки: *а* — корреляция инструментально определенных содержаний Zr и терригенного компонента (terr) в терригенно-карбонатных осадках Черного моря, которая использована для оценки концентрации Zr в terr путем экстраполяции соответствующей линейной зависимости к $\text{terr} = 100\%$ (ВКЗК — верхняя континентальная земная кора, ОКП — осадочные карбонатные породы); *б* — сопоставление оценок, полученных для Zr и других элементов (способ оценки аналогичен), с кларками ВКЗК. Как видно из рис. 6, *б*, все оценки близки к кларкам, однако Zr демонстрирует максимальную сопоставимость, что объясняется его экзогенной миграцией почти исключительно в собственной чрезвычайно устойчивой и распространенной минеральной форме (циркон).

К сожалению, из-за логистических, организационных и финансовых трудностей Проект был реализован далеко не в полной мере. Полученные данные можно рассматривать лишь как результаты опытной (предварительной) апробации. В ней [16, 17, 28, 41, 44] использованы данные по детритовым популяциям циркона и монацита, которые характеризуют два тестовых региона, сложенных контрастными по возрасту и составу образованиями: (1) «молодой» Антарктический полуостров, Западная Антарктида (АР) и (2) «древний» Украинский щит с сопредельной частью Восточно-Европейской платформы (ЕЕР). Последний имитировал докембрийский щит Восточной Антарктиды. Концентрации микроэлементов в единичных зернах минералов определены специальным вариантом рентген-флуоресцентного метода — milliprobe XRF (XRF MP/SG) [2, 20 и др.]. Оценки возраста зерен получены методом «общего свинца». Состав материнских для циркона пород определен при помощи ранее предложенной дискриминантной диаграммы Hf — Y. Полученные результаты дополняют современные данные о коровой эволюции в пределах тестовых регионов. Они трансформированы в региональные модели роста континентальной коры. Последние комплексированы с геохимическими моделями магматических систем этапов активизации коры соответствующих регионов, которые продемонстрированы на примере Коростенского плутона (ЕЕР) и вулкана острова Десепшен (АР). Разработаны

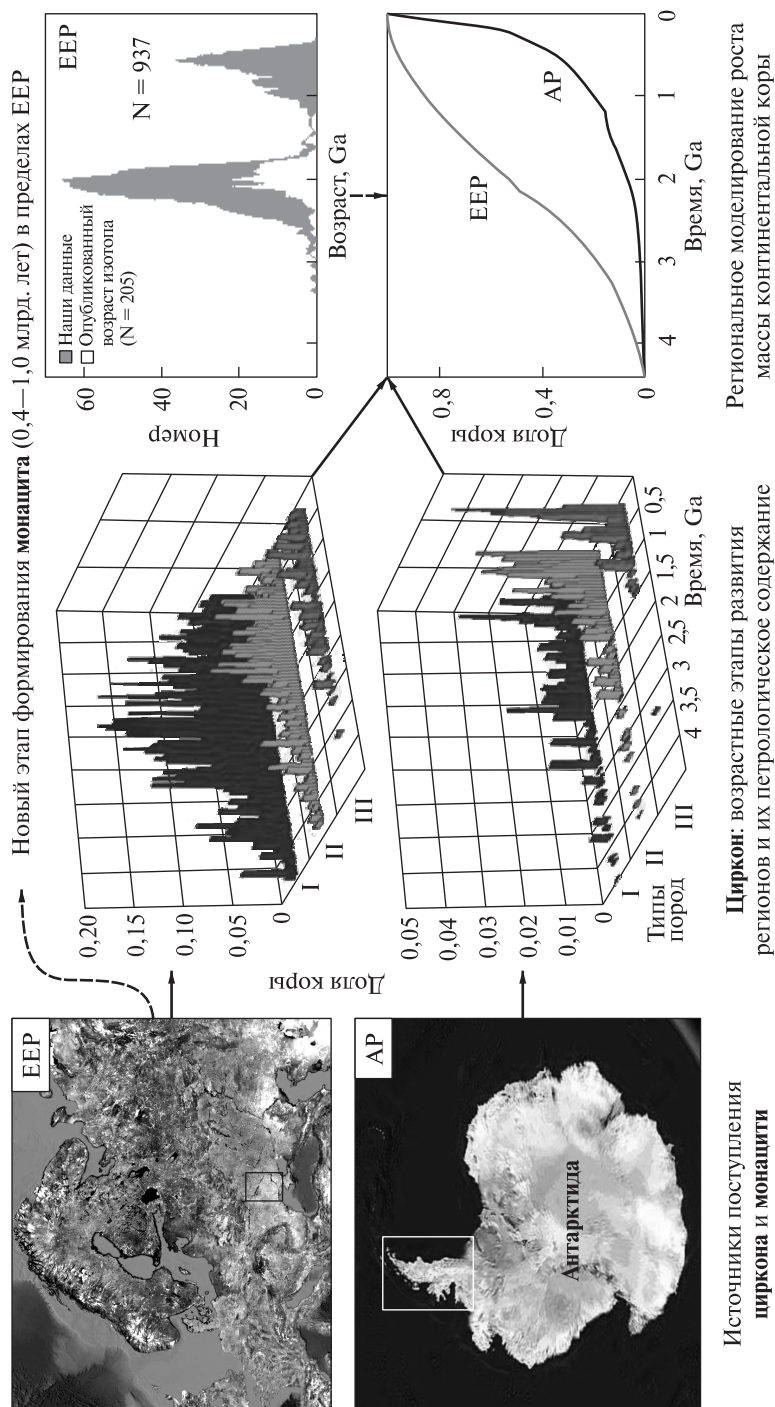


Рис. 7. Пример реставрации этапов развития регионов с оценкой их петрологического содержания и построением региональных моделей роста массы континентальной земной коры в ходе ее эволюции. Исходные данные — результаты геохимического исследования больших по объему выборок детритовых зерен циркона и монацига из ледниковых и аллювиальных отложений, источниками поступления которых служили Восточно-Европейская платформа (ЕЕР) и Антарктический полуостров (АР), Западная Антарктида [1, 3, 5, 16, 17, 21, 23–25, 31, 32, 41–44]

Геохимическая классификация цирконов

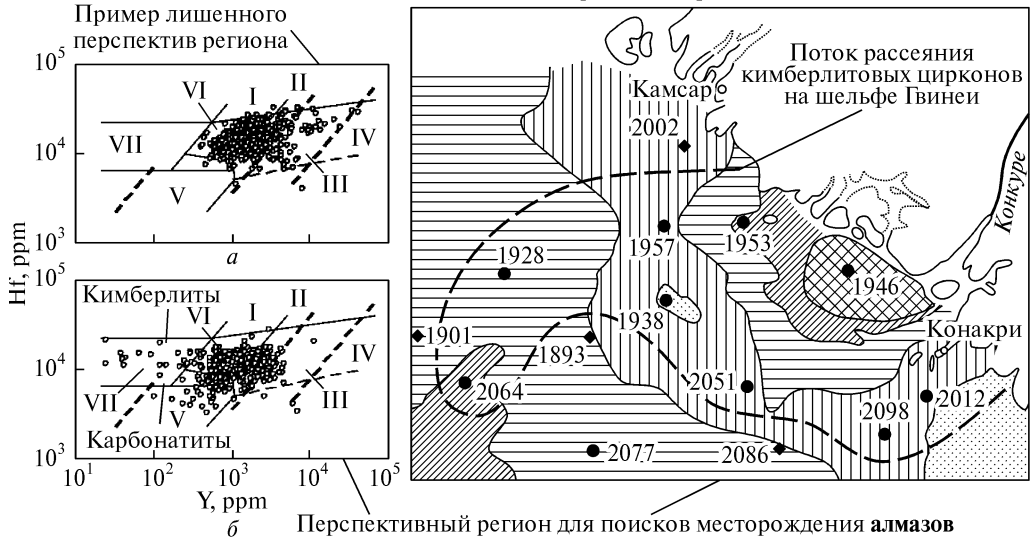


Рис. 8. Пример использования данных по геохимии детритовых популяций циркона для регистрации важнейших минерагенических событий (формирование месторождений алмаза, апатита и редких металлов) [3, 5, 16–18, 21–24, 26,31–33, 4–44]

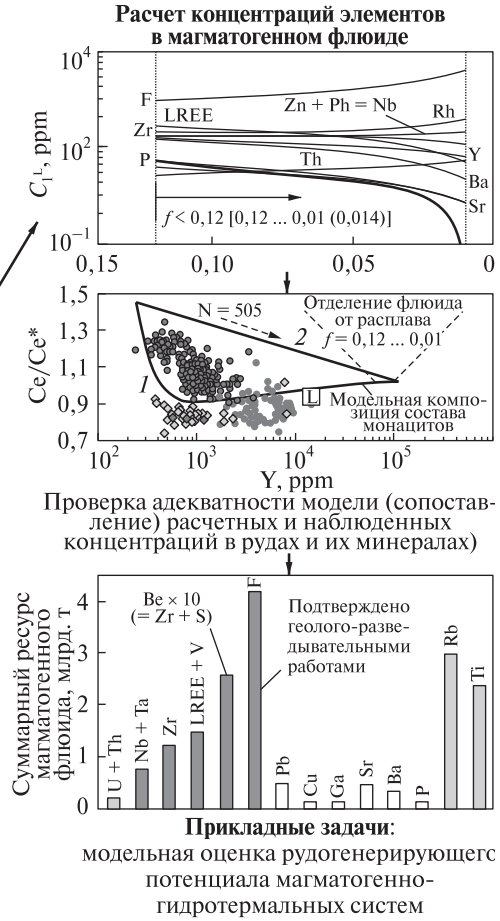
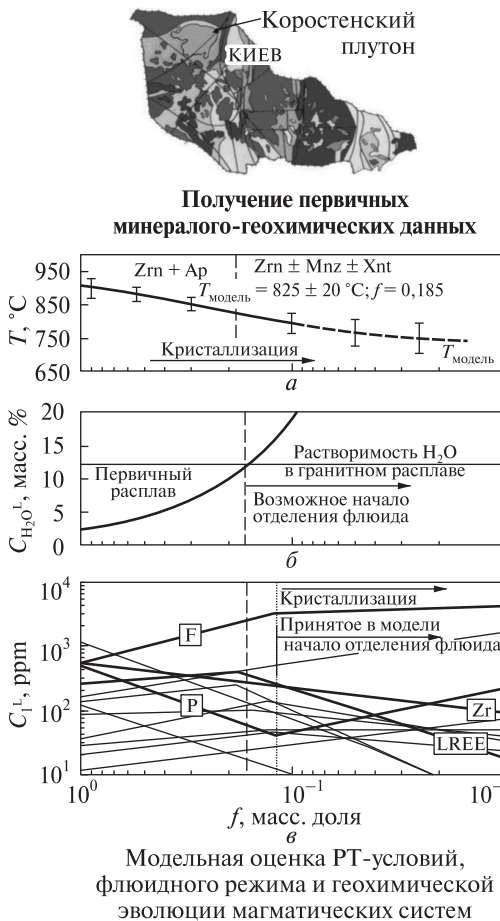


Рис. 9. Пример петролого-геохимического моделирования магматических систем и использование полученных результатов для решения прикладных задач [12, 21, 25–27, 29–31]

и апробированы процедуры для эффективного взаимного контроля надежности, согласования и объединения геохимических моделей обоих типов. Некоторые результаты приведены на рис. 6.

Некоторые перспективы реализации

Охарактеризованный подход был базовым для проекта IPY 2007/2008 «Circum Antarctic Zircon Census» (CAZIC), а сейчас предлагается для его дальнейшего перспективного использования в Антарктиде, а также для исследования других континентов с целью глобального ретроспективного мониторинга эволюции континентальной коры Земли. Для этого методологическая его часть была в значительной степени модифицирована и в современном варианте очень схематично представлена на рис. 5—9 с использованием наличествующих примеров применения. Основным условием успешного выполнения исследований такого типа (как и при проведении IPY 2006/2007, да и ранее — проект технически был реален уже с 1990 г., а с 1996 г. он активно предлагался для реализации) остается наличие необходимого логистического и финансового обеспечения, а также эффективного международного сотрудничества. Заметим, что подобные исследования сейчас развиваются очень интенсивно применительно к различным регионам Земли [34—36, 40, 39, 45, и др.], что, к счастью, грозит вскоре лишить их нетрадиционного статуса.

Выводы

1. Несмотря на лишь частичное выполнение проекта CAZIC в период проведения IPY 2007/2008, результаты апробации заложенной в нем методологии следует считать вполне успешными.

2. Как на настоящий момент, так и на достаточно далекую перспективу подобные проекты ввиду своей относительно низкой себестоимости, высокой экспрессности, эффективности и технологичности могут по праву претендовать на статус одного из важнейших источников достоверной информации о подледниковых геологических образованиях Антарктиды.

3. Спрос на такую информацию (во всех ее теоретических и прикладных аспектах) со стороны активно исследующих Антарктиду государств с каждым годом будет все более возрастать.

4. Эти соображения делают весьма актуальным возобновление проекта CAZIC на новом качественном уровне — проект CAZIC-II, а также его скорейшую успешную реализацию.

5. Обязательным условием успешной реализации проекта CAZIC-II в приемлемые сроки является должное логистическое, финансовое, организационное и аналитическое обеспечение (в первую очередь доукомплектование лабораторной базы проекта методом LA-ICP-MS, который при относительно низкой стоимости оборудования в качественном отношении соответствует SHRIMP).

Успешная реализация проекта CAZIC-II может обеспечить широкое международное сотрудничество и дать заметный экономический эффект за счет, например, привлечения грантов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Андреев А.В.* Современные возможности метода общего свинца в радиогеохронологических исследованиях / А.В. Андреев // Геол. журн. — 1992. — № 6. — С. 125—130.
2. *Андреев О.В.* Аналітичне забезпечення масового дослідження мікроелементного складу поодиноких зерен акцесорних мінералів (циркону та монациту) під час ІРУ 2007/2008 (PLATES & GATES/ CAZIC) / О.В. Андреев, С.П. Савенок, С.Є. Шнюков // III Міжнародна конференція «Наукові дослідження в Антарктиці» (III УАК 2006, 29 травня — 2 червня 2006 р., Київ, Україна). Тези. — Київ, 2006. — С. 41—42.
3. *Андреев А.В.* Реконструкция областей питания и критерии стратиграфического расчленения терригенных образований таврической серии Крыма по данным исследования вещественного состава песчаников. Статья 2: Результаты геохимического изучения терригенных цирконов из песчаников таврической серии / А.В. Андреев, С.Е. Шнюков, С.П. Савенок и [др.] // Геол. журн. — 1998. — № 3—4. — С. 66—74.
4. *Бахмутов В.Г.* Эволюция и геодинамика основных структур Западной Антарктики в мезокайнозое: Современные представления. / В.Г. Бахмутов // Український Антарктичний журнал. — 2006. — № 4—5. — С. 52—63.
5. *Бункевич О.Л.* Репрезентативність вибірки детритових акцесорних мінералів при позерновому геохімічному дослідженні їх популяцій. / О.Л. Бункевич, С.Є. Шнюков // Вісник Київського університету. Геологія. — Вип. 54. — 2011 — С. 15—18.
6. *Геология и металлогения Южного океана* [Гожик П.Ф., Орловский Г.Н., Митин Л.И. и др.] — Киев: Наук. думка, 1991. — 192 с.
7. *Грикуров Г.Э.* Геология Антарктического полуострова. / Г.Э. Грикуров // М.: Наука, 1973. — 214 с.
8. *Грикуров Г.Э.* Тектоническое районирование Антарктики / Г.Э. Грикуров, Г.Л. Лейченко, Е.Н. Каменев и [др.] // Арктика и Антарктика. 2003. Т. 2 (36). — С. 26—47.
9. *Грикуров Г.Э.* Тектоническое районирование Антарктики и ее минерагения / Г.Э. Грикуров, Г.Л. Лейченко, Е.Н. Каменев и [др.] // Арктика и Антарктика (Отв. ред. Котляков В.М.) — Выпуск 2(36) — М.: Наука, 2003 — С. 190—197.
10. *Грикуров Г.Э.* Минеральные ресурсы Антарктики: геологические предпосылки и перспективы освоения / Г.Э. Грикуров, Г.Л. Лейченко, Е.В. Михальский и [др.] // Разведка и охрана недр. 2000. — № 12. — С. 59—63.
11. *Иванов В.Л.* Геология и минеральные ресурсы Антарктиды. / В.Л. Иванов // ред. Е.Н. Каменев — Тр. НИИГА. — М.: Недра, 1990. — Т. 113. — 232 с.
12. *Лазарева І.І.* Геохімія процесів формування метасоматитів Сушано-Пержанської зони та їх найбільш розповсюджених акцесорних мінералів (Український щит) : Автореф. дис. ... канд. геол. наук :04.00.02 — геохімія / І.І. Лазарева. — Київ, 2006. — 22 с.
13. *Михальский Е.В.* Геология и эволюция земной коры восточной Антарктиды в протерозое — раннем палеозое: Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. / Е.В. Михальский — М.: 2007 — 40 с.
14. *Михальский Е.В.* Геологическое изучение Антарктиды: исторические аспекты и современное состояние / Е.В. Михальский, Е.Н. Каменев, А.С. Михальская // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2011 — № 2 (88). — С.97—112.
15. *Равич М.Г.* Кристаллический фундамент Антарктической платформы. / М.Г. Равич, Е.Н. Каменев : Л.: Гидрометеиздат, 1972. — 658 с.
16. *Савенок С.П.* Геохімічні особливості цирконів та монацитів з льодовикових та алювіальних відкладів як індикатори петрофону провінцій постачання (на прикладі Східно-Європейської платформи і Західної Антарктиди): Автореф. дис. ... канд. геол. наук. / С.П. Савенок — Київ, 2006. — 21 с.
17. *Савенок С.П.* Геохимия цирконов и монацитов из аллювиальных и ледниковых отложений Украины (Восточно-Европейская платформа) и Антарктического полуострова (Западная Антарктида): сопоставление и возможная интерпретация / С.П. Савенок, С.Е. Шнюков, А.В. Андреев и [др.] // Український антарктичний журнал — 2005. — № 3. — С. 57—66.
18. *Способ* поисков апатитовых месторождений, связанных с формацией щелочных интрузивных пород и карбонатитов: А.с. № SU 1338644 СССР / Е.Я. Марченко, Р.М. Файзуллин, В.И. Васенко, С.Е. Шнюков, А.К. Чебуркин, А.В. Андреев. — № 3873739/24—25; Заявлено 28.03.1985; Опубл. 15.05.1987. — 2 с.

19. *Тектоническая карта Антарктиды масштаба 1: 10 000 000 / Ред. Г. Э. Грикуров. — М.: Карт-фабрика объединения «Аэрогеология» Мингео СССР, 1978.*
20. *Шнюков С.Е. Рентгено-флуоресцентный анализ микроколичеств вещества в геохимии акцессорных минералов: исследовательские возможности в сопоставлении с локальными аналитическими методами / С.Е. Шнюков, А.В. Андреев, Е.А. Белоусова и [др.] // Минерал. журн. — 2002. — № 1. — С. 80–95.*
21. *Шнюков С.Е. Перспективні науково-дослідні та прогнозно-пошукові технології регіональних геохімічних досліджень / С.Е. Шнюков, О.В. Андреев, С.П. Савенок и [др.] // Зб. наук. праць УкрДГРІ. — 2005. — № 1. — С. 130–136.*
22. *Шнюков С.Е. Использование особенностей химического состава апатита при прогнозировании, поисках и оценке месторождений апатитовых руд на Украинском щите / С.Е. Шнюков, В.И. Васенко, А.В. Андреев и [др.] // Геол. журн. — 1987. — Т. 47, № 3. — С. 73–82.*
23. *Шнюков С.Е. Геохимия сквозных акцессорных минералов в терригенно-минералогических и прогнозно-поисковых исследованиях / С.Е. Шнюков // Геологические проблемы Черного моря. — К.: ОМГОР ННПМ НАНУ, 2001. — С. 55–78.*
24. *Шнюков С.Е. Геохимическая классификация цирконов и апатитов из ведущих типов горных пород и руд: современное состояние, применение и перспективы развития / С.Е. Шнюков // Геол. журн. — 2003. — № 1. — С. 99–103.*
25. *Шнюков С.Е. Геохимические модели эволюции магматических систем и земной коры: потенциальный источник петрофизической и рудогенетической информации / С.Е. Шнюков // Геофиз. журн. — 2002 — № 6. — С. 201–219.*
26. *Шнюков С.Е. Геохімія елементів-домішок в найбільш розповсюджених акцесорних мінералах: Автореф. дис. ... докт. геол. наук. / С.Е. Шнюков — Київ, 2003. — 35 с.*
27. *Шнюков С.Е. Геохімічне моделювання в дослідженні генетичного зв'язку магматичних комплексів та просторово асоціюючих з ними гідротермально-метасоматичних рудних родовищ / С.Е. Шнюков, І.І. Лазарева // Зб. наук. праць УкрДГРІ. — 2002. — № 1–2. — С. 128–143.*
28. *Шнюков С.Е. Геохімічне моделювання магматичної системи вулканічного острова Десепшн (Західна Антарктида): принципи та задачі / С.Е. Шнюков, І.І. Лазарева, О.А. Хлонь та [ін.] // Вісник Київського національного університету ім. Тараса Шевченка. Геологія. — 2011. — № 52. — С. 29–33.*
29. *Шнюков С.Е. Оцінка рудогенеруючого потенціалу магматогенно-гідротермальних систем за результатами геохімічного моделювання / С.Е. Шнюков, І.І. Лазарева, О.А. Хлонь та [ін.] // Геохімія та рудоутворення. — 2012 — № 31–32. — С. 105–112.*
30. *Шнюков С.Е. Наскрізнi акцесорні мінерали в геохімічному моделюванні магматичних процесів / С.Е. Шнюков // Зб. наук. праць УкрДГРІ. — 2001. — № 1–2. — С. 41–53.*
31. *Шнюков С.Е. Геохимия «сквозных» сосуществующих акцессорных минералов и ее роль в исследовании эндо- и экзогенных геологических процессов / С.Е. Шнюков, А.К. Чебуркин, А.В. Андреев // Геол. журн. — 1989. — № 2. — С. 107–114.*
32. *Шнюков С.Е. Перспективы, проблемы и возможная методика терригенно-минералогических исследований с использованием типохимических особенностей «сквозных» терригенных минералов / С.Е. Шнюков, А.К.Чебуркин, А.В. Андреев // Геол. журн. — 1991. — № 6. — С. 100–115.*
33. *Шнюков С.Е. Джерела зносу терригенного матеріалу та прогнозна оцінка донних відкладів шельфа Гвінеї за даними геохімічного вивчення терригенних цирконів / С.Е. Шнюков, А.К. Чебуркін, О.В. Андреев // Аспекти геології металевих і неметалевих корисних копалин. — К.: ІГН НАНУ, 2002. — С. 143–157.*
34. *Belousova E.A., Griffin W.L., O'Reilly S.Y. and Fisher N.I. Igneous zircon: trace-element composition as an indicator of source rock type // Contributions to Mineralogy and Petrology. — 2002. — Vol. 143. — P. 602–622.*
35. *Griffin W.L., Belousova E.A., Shee S.R., Pearson N.J. and O'Reilly S.Y. Archean crustal evolution in the northern Yilgarn Craton: U-Pb and Hf-isotope evidence from detrital zircons // Precambrian Research — 2004. — Vol. 131. — P. 231–282.*

36. *Griffin W.L., Belousova E., Walters S.G. and O'Reilly S.Y.* Archaean and Proterozoic crustal evolution in the Eastern Succession of the Mt Isa district, Australia: U-Pb and Hf-isotope studies of detrital zircons // *Australian Journal of Earth Sciences (Mt Isa Special Volume)*. — 2006. — Vol. 53. — P. 125–149.
37. *Grikurov G.E.* Structure of Antarctica and outline of its evolution // Craddock C. (ed.) / *Antarctic geosciences*. — Madison: The University of Wisconsin Press. — 1982. — P. 791–804.
38. *Mineral resources potential in Antarctica* / Ed. J.F.Spletstoesser, G.A.M.Dreschhoff // *Antarctic Res. Ser.* — 1990. — Vol. 51. — 319 p.
39. *Rino S., Komiya T., Windley B.F., Katayama I., Motoki A., Hirata T.* Major episodic increases of continental crustal growth determined from zircon ages of river sands: implications for mantle overturns in the Early Precambrian // *Physics of the Earth and Planetary Interiors*. — 2004. — Vol. 146. — P. 369–394.
40. *Safonova I., Maruyama S., Hirata T., Kon Y., Rino S.* LA ICP MS U-Pb ages of detrital zircons from Russia largest rivers: Implications for major granitoid events in Eurasia and global episodes of supercontinent formation // *Journal of Geodynamics*. — 2010 — Vol. 50, Issues 3–4. — P. 134–153.
41. *Savenok S.P., Shnyukov S.E., Andreev A.V., Morozenko V.R., Omelchuk O.D.* Region-scale geological investigations of the subglacial terranes of Antarctica: main rock types identification and terrane-scale geological events determination on a basis of single-grain trace element geochemistry of zircon large detrital populations from glacial sediments (Antarctic Peninsula as an example) // 2nd Ukrainian Antarctic Meeting «Antarctic Peninsula: key region for environment change study» (2UAM2004 June 22–23, 2004, Kyiv, Ukraine). Abstracts. — Kyiv, 2004. — P. 35.
42. *Shnyukov S.E., Andreev A.V., Savenok S.P.* Monitoring of the region-scale geological/metallogenic events on a basis of single-grain trace element geochemistry of zircon, monazite and apatite large detrital populations: Ukrainian Shield and some other regions as an example // *International Symposium «Metallogeny of Precambrian Shields»* (Kyiv, Ukraine, September 13–26, 2002). The Abstracts. — Kyiv, 2002. — P. 83–85.
43. *Shnyukov S.E., Savenok S.P., Andreev A.V., Sinitsyn V.A., Morozenko V.R.* Circum Antarctic Zircon Census (CAZIC/PLATES & GATES/IPY 2007/2008) // III Ukrainian Antarctic Conference «Scientific Investigations in Antarctica (III UAK 2006, 29 May – 2 June 2006, Kyiv, Ukraine). Abstracts. — Kyiv, 2006. — P. 37–38.
44. *Shnyukov S.E., Savenok S.P., Andreev A.V., Lytvynov V.A., Milinevsky G.P., Morozenko V.R.* Single-grain Geochemistry of Zircon and Monazite Detrital Populations from Glacial Sediments as a Tool for Geological Study of Subglacial Terranes of Antarctica During IPY 2007/2008: Pilot Test Examples // *SCAR XXIX Open Science Conference* (Hobart, Australia, 12–14 July 2006). Abstract Volume. — Hobart, 2006. — P. 210.
45. *Veevers J.J., Saeed A.* Central Antarctic provenance of Permian sandstones in Dronning Maud Land and the Karoo Basin: Integration of U-Pb and TDM ages and host-rock affinity from detrital zircons // *Sedimentary Geology* — 2007 — Vol. 202, — P. 653–676.

Статья поступила 11.02.2013

ПРОЕКТ ГЛОБАЛЬНОГО ГЕОЛОГІЧНОГО ДОСЛІДЖЕННЯ ПІДЛЬОДОВИКОВОЇ АНТАРКТИДИ

Традиційні методи непридатні для дослідження підльодовикових геологічних утворень Антарктиди. Продемонстровано, що регіонально узагальнені результати можуть бути отримані за рахунок геохімічного вивчення поодиноких зерен НАМ («наскрізні» акцесорні мінерали: циркон, монацит тощо) великих за обсягом детритових популяцій з льодовикових відкладів, які об'єктивно відображують склад, вік та, що важливо, об'ємні співвідношення порід у межах території (блока кори), що дринується льодозбірним басейном. В попередній апробації використано дані щодо детритових популяцій циркону та монациту, які характеризують два тестових регіона, що складені контрастними за віком і композицією утвореннями: (1) фанерозойський Антарктичний півострів, Західна Антарктида (AP) та (2) докембрійський Український щит з частиною Східно-

Європейської платформи (ЕЕР). Останній імітував докембрійський щит Східної Антарктиди. Концентрації мікроелементів в одиничних зернах циркону та монациту визначені спеціальним варіантом рентген-флуоресцентного методу — milliprobe XRF (XRF MP/SG). Оцінки віку зерен одержані методом «загального свинцю». Композиція материнських для циркону порід визначена за допомогою запропонованою раніше дискримінантної діаграми Hf — Y. Одержані результати доповнюють існуючі дані щодо корової еволюції в межах тестових регіонів. Вони були трансформовані в регіональні моделі росту континентальної земної кори. Останні комплексуються з генералізованими геохімічними моделями магматичних систем етапів активізації кори відповідних регіонів, що продемонстровано на прикладі Коростенського плутону (ЕЕР) і вулкану острова Десепшен (АР). Розроблено процедури для ефективного взаємного контролю надійності, узгодження та об'єднання геохімічних моделей обох типів. Охарактеризований підхід був базовим для проекту IPY 2007/2008 «Circum Antarctic Zircon Census» (CAZIC), а зараз пропонується для його подальшого перспективного розвитку в Антарктиді, а також для дослідження інших континентів з метою глобального ретроспективного моніторингу еволюції континентальної кори Землі.

S.E. Shnyukov

A PROJECT OF THE GLOBAL GEOLOGICAL STUDY OF SUBGLACIAL ANTARCTICA

Standard procedures are inapplicable to geological study of subglacial terranes of Antarctica. Region-scale results may be obtained by means of single-grain trace element geochemical study of zircon and monazite large detrital populations produced from region-scale heavy mineral sampling of glacial sediments that reflect provenance. Pilot test study was concentrated on zircon (N=2684) and monazite (N=937) detrital populations that represent two test source regions: (1) «young» Antarctic Peninsula in Western Antarctica (AP) and (2) «old» Ukrainian Shield with neighbouring part of East-European Platform (EEP). Last one typifies terranes of Eastern Antarctica. Trace element content in each grain of both minerals was determined by means of special («single-grain») version of milliprobe XRF (XRF MP/SG). «Total lead» method was used for their age dating. Zircon's parent rocks identification was based on earlier suggested Hf Y discriminant diagram. Obtained zircon's data set may be regarded as a representative contribution to present-day information about the crustal evolution within the both AP and EEP regions. These data were resulted in regional-scale models of progressive growth of the Earth's crust. Models of the last type are closely connected with the generalized geochemical models of the magmatic systems which were demonstrated on examples of Korosten pluton (Ukrainian Shield) and Deception Island volcano (Western Antarctica). Designed final validity test procedure allows to verify final results of both models. This approach was proposed as a basis for IPY 2007/2008 project «Circum Antarctic Zircon Census» (CAZIC) as well as for further geological exploration of subglacial terranes of Antarctica. But it may be realized not only for Antarctic regions but for other source ones too as an effective tool for global Earth's crust monitoring.