

УДК (552.1):550.3 + 550.85

**МАГНИТНЫЕ И ПЛОТНОСТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ МАГМАТИЧЕСКИХ ПОРОД В РАЙОНЕ УАС АКАДЕМИК ВЕРНАДСКИЙ**

*В.В. Шпыра<sup>1</sup>, В.Г. Бахмутов<sup>1</sup>, Л.Н. Бахмутова<sup>3</sup>, Д.П. Гладкочуб<sup>2</sup>,  
А.В. Кошелев<sup>4</sup>, Т.В. Скарбовийчук<sup>1</sup>, В.И. Якухно<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> *Институт геофизики им. С.И. Субботина, Национальная Академия наук Украины, пр. Палладина, 32, 03680 Киев, Украина, bakhmutovvg@gmail.com*

<sup>2</sup> *Институт земной коры, Сибирское отделение Российской Академии Наук, 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 1*

<sup>3</sup> *Национальный антарктический научный центр Министерства образования и науки Украины, г. Киев, б. Шевченко, 16*

<sup>4</sup> *Институт геохимии, минералогии и рудообразования им. Н.П. Семеновко, Национальная Академия наук Украины, г. Киев, пр. Палладина, 34*

В результате исследований магнитных и плотностных свойств более чем 500 образцов мезозойских и палеоценовых интрузивных и вулканогенных пород, отобранных в западной части Антарктического полуострова (район станции Академик Вернадский), получена новая информация о петрофизических характеристиках разных породообразующих комплексов. Породы характеризуются широким диапазоном значений как магнитных (магнитная восприимчивость – от 0.0016 до 0.26 ед. СИ, естественная остаточная намагниченность – от 0.0045 до 8.37 А/м), так и плотностных (от 2.57 до 3.3 г/см<sup>3</sup>) параметров. Различия в плотностных и магнитных характеристиках пород разных петрографических групп укладываются в общие закономерности их изменений в породах кислого, среднего и основного составов. Соответственно средние значения плотности составляют 2.65, 2.77 и 2.9 г/см<sup>3</sup>, магнитной восприимчивости – 0.02, 0.036 и 0.068 ед. СИ, естественной остаточной намагниченности – 0.16, 0.3 и 2.08 А/м. Новый фактический материал является базовым для параметризации гравитационных и магнитных моделей, рассчитываемых по аномальным потенциальным полям.

**Магнітні та густинні характеристики магматичних порід у районі УАС Академік Вернадський**  
В.В. Шпыра, В.Г. Бахмутов, Л.Н. Бахмутова, Д.П. Гладкочуб, О.В. Кошелев, Т.В. Скарбовийчук, В.И. Якухно  
**Реферат.** В результаті досліджень магнітних і густинних властивостей більш ніж 500 зразків мезозойських і палеоценових інтрузивних і вулканогенних порід, відібраних у західній частині Антарктичного півострова (район станції Академік Вернадський), отримано нову інформацію про петрофізичні характеристики різних породоутворюючих комплексів. Породи характеризуються широким діапазоном значень як магнітних (магнітна сприйнятливості – від 0.0016 до 0.26 од. СІ, природна залишкова намагніченість – від 0.0045 до 8.37 А/м), так і густинних (від 2.57 до 3.3 г/см<sup>3</sup>) параметрів. Відмінності в густинних і магнітних характеристиках різних петрографічних груп укладаються в загальні закономірності їх змін у породах кислого, середнього та основного складів. Відповідно середні значення густини складають 2.65, 2.77 і 2.9 г/см<sup>3</sup>, магнітної сприйнятливості – 0.02, 0.036 і 0.068 од. СІ, природної залишкової намагніченості – 0.16, 0.3 і 2.08 А/м. Новий фактичний матеріал є базовим для параметризації гравітаційних та магнітних моделей, які розраховуються за аномальними потенціальними полями.

**Magnetic and density characteristics of igneous rocks near the Ukrainian antarctic station Akademik Vernadsky**

V. Shpyra, V. Bakhmutov, L. Bakhmutova, D. Gladkochub, A. Koshelev, T. Skarbovychuk, V. Yakukhno  
**Abstract.** As a result of studies of the magnetic properties and density of more than 500 samples of Mesozoic and Paleocene intrusive and volcanic complexes sampled in the western Antarctic Peninsula (Vernadsky base

area), new information for the petrophysical characteristics of rocks was obtained. Rocks are characterized by a wide range of values both magnetic (magnetic susceptibility – from 0.0016 to 0.26 SI, natural remanent magnetization – from 0.0045 to 8.37 A/m) and density (from 2.57 to 3.3 g/cm<sup>3</sup>) parameters. Differences in density and magnetic characteristics of rocks of various petrographic groups fit into the general laws of their changes in rocks from acid to basic compound. Accordingly, the average densities are 2.65, 2.77 and 2.9 g/cm<sup>3</sup>, the magnetic susceptibility of 0.02, 0.036 and 0.068 SI, natural remanent magnetization – 0.16, 0.3 and 2.08 A/m. New data are the basis for parameterization of gravity and magnetic models which have been calculated for anomalous potential fields.

**Key words:** Antarctic Peninsula, Andean intrusive suite, magnetic susceptibility, density, petrology

## 1. Введение

Изучение физических свойств горных пород позволяет судить об их составе, структуре, происхождении, а также о природе аномалий геофизических полей. Физические свойства определяются как через параметры измеренных полей, так и прямыми методами. Прямые, выполненные в лаборатории измерения при достаточной статистике являются более точными, чем расчётные, а разница может достигать нескольких десятков процентов.

Данные о распределении магнитных и плотностных свойств основных породообразующих комплексов необходимы для параметризации начальных гравитационных и магнитных моделей, а также для интерпретации конечных моделей глубинной структуры земной коры. Для решения таких задач в Западной Антарктике ранее выполнялись петрофизические исследования (см., например, [Garrett, 1990; Лебедев и др., 2002; Буртный и др., 2003; Корчин и др., 2004; Савенко и др., 2005; Yegorova et al., 2011]) для получения скоростных, плотностных и магнитных параметров основных породообразующих комплексов. За последние годы во время проведения сезонных Украинских антарктических экспедиций были собраны новые коллекции образцов горных пород, что позволило как расширить территорию исследований, так и получить новый, более достоверный и статистически обоснованный фактический материал.

В данной работе мы представляем обобщение данных по магнитным и плотностным характеристикам мезозойских и палеоценовых интрузивных и вулканогенных пород, которые слагают свободную ото льда территорию островных архипелагов Западно-антарктического шельфа и прилегающую береговую линию Антарктического полуострова в районе Украинской антарктической станции Академик Вернадский. Исследованная коллекция образцов отбиралась на протяжении нескольких сезонных экспедиций и на сегодняшний день насчитывает более 500 образцов.

## 2. Геология района, геохимия и возраст пород

Антарктический полуостров (АП) является крупнейшим тектоническим блоком Западной Антарктики. Традиционно он рассматривается как магматическая дуга, сформировавшаяся вдоль юго-западной части палео-тихоокеанской окраины при распаде суперконтинента Гондвана [Storey & Garret, 1985]. Тихоокеанская окраина АП была активной зоной на протяжении всего позднего мезозоя-кайнозоя, что было обусловлено последовательной субдукцией плиты Феникс под блок АП. На протяжении кайнозоя эти процессы постепенно угасали в направлении ЮЗ–СВ [Larter & Barker, 1991; Larter et al., 1997; Jin et al., 2002]. В результате разные участки континентальной окраины АП отличаются глубинным строением и эволюцией. Можно выделить активный сегмент, характеризующийся субдукцией фрагмента прото-плиты Феникс под Южный Шетландский желоб, и пассивный сегмент, расположенный юго-западнее в районе моря Беллинсгаузена [Yegorova et al., 2011]. К последнему и относится рассматриваемая в настоящей работе территория (южнее острова Анверс, район архипелага Аргентинские острова, прилегающие

островные архипелаги и западное побережье АП, рис. 1), где тектоническая активность завершилась в позднем миоцене-раннем плиоцене.

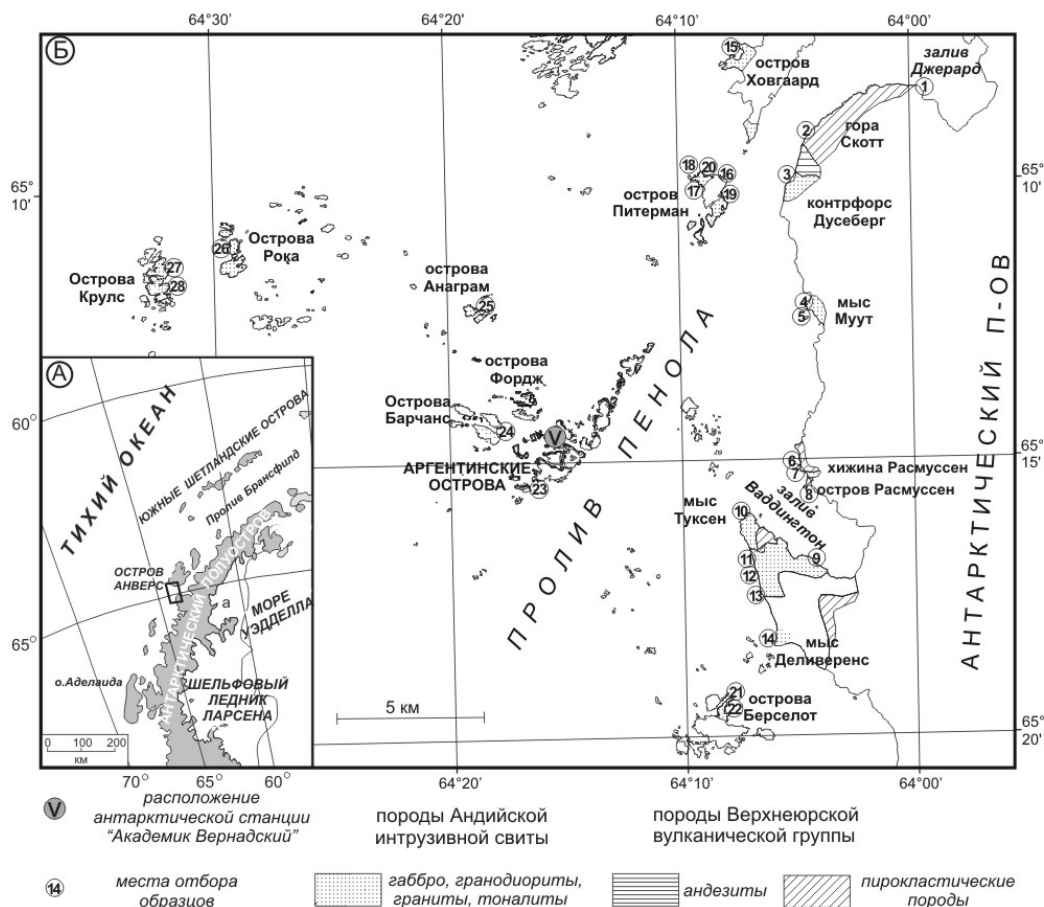


Рис. 1. (А) – Антарктический полуостров, прямоугольником указан район работ; (В) – места отбора образцов в районе архипелага Аргентинские острова, прилегающих островных архипелагов и береговой линии Антарктического полуострова. Нумерация пунктов отбора образцов соответствует нумерации в таблице.

Около 80% пород, слагающих Западную Антарктику и прилегающую территорию шельфа моря Беллингаузена, представлены двумя группами пород – интрузивными образованиями, которые известны как Андийская интрузивная свита (Andean Intrusive Suite) либо как породы батолита Антарктического полуострова (AP batholiths), и вулканогенными породами (AP Volcanic Group) [Thomson & Pankhurst, 1983; Leat et al., 1995; Willan & Kelley, 1999]. Интрузивные породы образовывались в диапазоне от ~240 до 10 млн. лет назад при пике активизации в раннем мелу [Leat et al., 1995]. Они представлены в основном габбро и гранитоидами (с преобладанием диоритов), которые сильно отличаются по химическому составу: разнообразные габброиды, породы среднего состава (диориты и кварцевые диориты), кислые разновидности пород (тоналиты, граниты, гранодиориты, аплиты). По возрастным оценкам породы кислого состава относят к более поздним относительно пород среднего и основного состава. Группа вулканогенных пород АП, традиционно относимых к верхней юре, представлена андезитами, диабазами, базальтами, риолитами, долеритами и дацитами,

которые слагают жилы, дайки, толщи пирокластических пород вперемешку с базальтовыми потоками. В районе наших работ представлены породы обеих групп. Более детально геология и петрология района работ описаны в [Elliot, 1964; Curtis, 1966; Бахмутов, 1998].

Результаты геохимических исследований интрузивных пород указывают, что содержание в них  $\text{SiO}_2$  колеблется от 40 до 70 % (рис. 2). На диаграмме TAS ( $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ ) условно можно выделить два поля максимальной концентрации, которые относятся к габброидам и гранитоидам. Среди последних также можно выделить две области концентрации, и забегая вперед, отметим, что далее мы условно разделим их на две группы – диориты и гранодиориты-граниты. Полученные в ходе петролого-геохимических исследований образцов результаты детально описаны в [Гладкочуб и др., 2012].

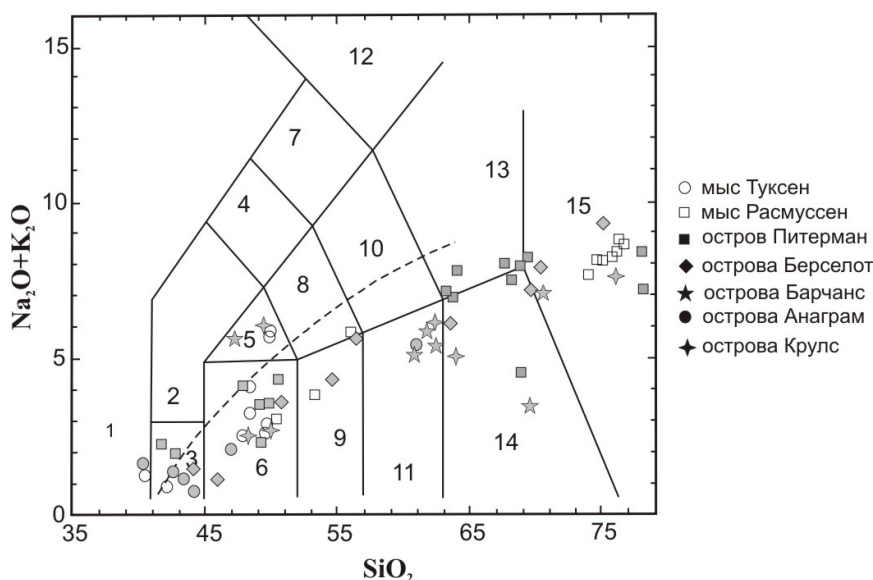


Рис. 2. Диаграмма TAS ( $\text{SiO}_2 - (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ ) для интрузивных пород андийского комплекса. Классификационные поля (TAS диаграмма, [Le Maitre, 1989]): 1 – фойдолит, 2 – фойдогаббро, 3 – перидотитовое габбро, 4 – фойдомонциодорит, 5 – монцогаббро, 6 – габбро, 7 – фойдомонцосиенит, 8 – монциодорит, 9 – габбро-диорит, 10 – монцонит, 11 – диорит, 12 – фойдосиенит, 13 – сиенит-кварцевый монцонит, 14 – гранодиорит, 15 – гранит. Штриховая линия разделяет поля щелочных и известково-щелочных пород.

Вопрос о возрасте пород Андийского комплекса до настоящего времени остается предметом дискуссий. Во многом подобная ситуация обусловлена тем, что в составе комплекса фигурируют разнообразные по своему составу образования – от более ранних габброидов до наиболее поздних аплитов. Для исследуемого в данной работе района Rb-Sr валовые и K-Ar минеральные (биотит) датировки островных архипелагов отвечают интервалу 50–93 млн. лет назад, в то время как U-Pb датировки по зернам циркона пород, обнажающихся вдоль западного побережья АП, дают диапазон возрастов от 117 до 85 млн. лет [Tangeman et al., 1996]. Сводка результатов геохронологических определений, выполненных на исследуемой территории, в том числе и при участии авторов данной статьи, U-Pb методом по единичным зернам циркона и Ag/Ag методом по монофракциям биотита и плагиоклаза, приведена в [Бахмутов и др., 2013].

Совокупность этих данных указывает, что для большинства проанализированных пород ранних ассоциаций Андийского комплекса (96–88 млн. лет) отчетливо определяется субдукционно-обогащенный литосферный источник. Для более молодых, раннекайнозой-

ских образований (около 60 млн. лет назад) отмечается смешанный (гетерогенный) источник, возникший в результате смешения субдукционного и «обогащенного астеносферного» компонентов. Последовательность событий, приведенная в [Бахмутов и др., 2013], отражает эволюцию тектонических процессов в исследуемом регионе, характерную для развития активных континентальных окраин андийского типа.

### 3. Методика исследований

Коллекция образцов охватывает все разности пород, которые являются наиболее характерными для данной территории, а именно интрузивные породы как кислого, так и основного составов, а также вулканиты. Часть образцов была отобрана из комагматических даек, результаты по ним мы не приводим, поскольку это тема отдельного исследования. Отбор образцов проводился на максимально доступной, свободной ото льда площади отдельных островов и побережья АП вдоль береговой линии (рис. 1). При этом особое внимание уделялось выбору пород с ненарушенной текстурой без признаков вторичных изменений.

Известно, что любые магнитные свойства и характеристики горных пород определяются условиями их образования и последующих изменений. Кроме геологических факторов общего характера (термодинамические условия образования породы, глубина магматического очага, скорость излияния и кристаллизации, характер и интенсивность метаморфизма и др.), в качестве определяющих магнитные свойства горных пород можно рассматривать и конкретные (вещественные) факторы: концентрацию, состав, структуру и текстуру ферромагнитных компонентов [Шолпо, 1977].

Концентрация ферромагнетика в породах связана с химическим составом породообразующей магмы и термодинамическими условиями кристаллизации, а также с интенсивностью проявления вторичных процессов. Изучение и практическое использование этих связей возможно на основе магнитной оценки концентрации ферромагнетика по магнитной восприимчивости (МВ) пород. Последняя является статистической мерой содержания в породе ферромагнитных минералов титаномагнетитового ряда, и ее изменения определяются главным образом вариациями этого содержания. Плутонические породы содержат минералы титаномагнетитовой серии, образующиеся на разных этапах кристаллизации магмы и в разной степени измененные под воздействием вторичных процессов. Некоторые из этих процессов (хлоритизация, альбитизация и др.) приводят к разрушению первичных магнитных минералов. Наоборот, такие процессы, как серпентинизация, часто биотизация, способствуют новообразованию магнетита в породах. Строгая корреляция между концентрацией ферромагнетика в породе и ее основностью отсутствует. В общем случае, вследствие большего содержания железа, в основных породах больше минералов титаномагнетитовой серии, чем в кислых. На концентрации магнитных минералов в магматических породах сказываются окислительно-восстановительные условия, которые в свою очередь тесно связаны с конкретной тектонической обстановкой магматизма. Кроме того, концентрация также имеет определенную связь с глубиной магмообразования. Основываясь на данных многочисленных экспериментов можно предполагать, что в условиях земной коры и верхней мантии предельная глубина существования магнитных минералов составляет 50–60 км и в зависимости от других условий (например, окислительно-восстановительных) может только уменьшаться.

Привлечение другой магнитной характеристики – естественной остаточной намагниченности (ЕОН), которая в большинстве случаев рассматривается во взаимосвязи с МВ, даёт ценную петромагнитную информацию об условиях образования и изменения магнитных минералов пород, например, о температуре и др. Основной закон распределения этих величин в генетически единой группе образцов горных пород логарифмически нормальный, что связано с их главной зависимостью от концентрации магнитных минералов в породе (это можно объяснить на основе ряда моделей (или схем) логнормального

распределения содержания примесей в породах). Однако сопоставление этих величин (ЕОН и МВ) в какой-то мере снижает влияние концентрации ферромагнетика и, напротив, усиливает влияние его состава. Следует отметить, что, помимо аналитических лабораторных исследований, рациональным (производительным и экономичным) способом регионального изучения распределения концентрации магнитных минералов в породах является оценка средней намагниченности пород по создаваемому ими аномальному магнитному полю.

Информативным параметром, широко используемым в петромагнетизме, является отношение ЕОН образца к его индуктивной намагниченности, созданной в геомагнитном поле, – отношение (фактор) Кенигсбергера  $Q$ . Этот параметр широко используется для оценки вклада естественной остаточной намагниченности и индуктивной намагниченности в магнитные аномалии, а также для примерной оценки магнитной стабильности. Поскольку числитель и знаменатель отношения являются функцией концентрации, фактор  $Q$  мало зависит от общей концентрации магнитных минералов в образце, но зависит от соотношений концентраций разных по магнитной жёсткости минералов. В зависимости от размера зерен, их магнитного состояния, вида ЕОН и др. величина  $Q$  может колебаться от десятых долей единицы до сотен единиц. С ростом температуры, особенно близ точки Кюри материала, отношение Кенигсбергера падает (эффект Гопкинсона). Следовательно, в разрезе литосферы с глубиной, где температура более 300–400°С, в намагниченности пород, а значит и в величине магнитной аномалии, должен преобладать вклад индуктивной намагниченности.

Плотность горных пород, определяемая отношением массы породы к её объёму, зависит от их минерального состава, структурно-текстурных особенностей, пористости, вида вещества, заполняющего поры и пустоты, а также от условий образования и залегания пород. Плотностная дифференциация горных пород в недрах определяет ряд тектонических и магматических процессов. На различии в плотности горных пород основана гравиметрическая разведка – метод разведочной геофизики. Её результаты используются для изучения строения земной коры, поиска и разведки месторождений полезных ископаемых.

В магматических горных породах плотность повышается от кислых разностей к основным и ультраосновным по мере уменьшения содержания лёгкого кремнезёма и постепенного увеличения содержания тяжёлых элементов (например, плотность гранитов в среднем 2.6 г/см<sup>3</sup>, гранодиоритов 2.65 г/см<sup>3</sup>, габбро 2.9 г/см<sup>3</sup>, пироксенитов 3.2 г/см<sup>3</sup>). Плотность метаморфических пород изменяется в диапазоне от 2.4 до 3.4 г/см<sup>3</sup> и зависит от их состава, вида и степени метаморфизма. Например, снижение плотности горных пород на 20–40% наблюдается при гидротермально-метасоматических изменениях, увеличение – при контактовом метаморфизме.

Интрузивные комплексы пород, образующиеся в процессе магматической дифференциации как многофазные интрузии, сопровождаются закономерным изменением плотности – она уменьшается от фазы к фазе с уменьшением основности пород. Независимо от основности и плотности пород первой фазы породы последней фазы каждого комплекса имеют наиболее кислый (нормальный или щелочной) состав и плотность 2.57–2.6, реже 2.62 г/см<sup>3</sup> [Физические..., 1984].

Измерения магнитных параметров коллекции образцов выполнялись на аппаратуре палеомагнитной лаборатории и Центра коллективного пользования магнитометрической аппаратурой Института геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, которая находится на магнитной станции с. Демидов (в 30 км к северу от г. Киева). Естественная остаточная намагниченность образцов измерялась на спин-магнитометре JR-6, установленном в немагнитной комнате ММVFTB. Магнитная восприимчивость измерялась на мостике переменного тока (каппа-метре) МФК-1В. Плотность измерялась методом гидростатического взвешивания, без парафинирования и прогрева образцов.

## 4. Результаты исследований

В таблице приведены магнитные и плотностные характеристики магматических пород в районе архипелага Аргентинские острова и прилегающей территории Антарктического полуострова. Общее распределение всех значений для интрузивных пород удобно представить в виде диаграмм (рис. 3). Очевидно, что в нашей выборке преобладают породы с пиковыми значениями ЕОН, МВ и фактора Q соответственно 0.01–0.05 А/м, 002–004 ед. СИ и 0.1–0.4, и разброс значений довольно велик. Диапазон распределения плотности также довольно широк – от 2.57 до 3.31 г/см<sup>3</sup>, в распределении плотности можно выделить два пика и преобладают породы с плотностью в диапазоне 2.7–2.95 г/см<sup>3</sup>, которые составляют 90% выборки.

Таблица

Магнитные и плотностные характеристики магматических пород в районе архипелага Аргентинские острова и прилегающей территории Антарктического полуострова

№	Место отбора проб	Номера образцов	Порода	ЕОН, А/м	Магнитная восприимчивость, 10 <sup>-6</sup> СИ	Фактор Q	Плотность, г/см <sup>3</sup>
<b>Побережье Антарктического полуострова и прилегающие острова</b>							
1	<i>Girard Bay</i> залив Джерард (64.0°W, 65.138°S)	158-165, B200-B204	габбро	<u>0.35-2.0</u> 1.04	<u>0.007-0.018</u> 0.011	<u>1.7-3.8</u> 2.66	<u>2.8-2.852</u> 2.83
2	<i>Mount Scott</i> Подойва г. Скотт (64.081°W, 65.161°S)	121-130 10/253-10/266	базальт	<u>0.006-0.2</u> 0.05	<u>0.00003-</u> <u>0.03</u> 0.008	<u>0.02-2.6</u> 0.8	<u>2.69-2.85</u> 2.77
3	<i>Duseberg Buttress</i> Контрфорс Дусеберга (64.1°W, 65.16°S)	131-137, B077-B091	диорит	<u>0.12-0.9</u> 0.4	<u>0.01-0.054</u> 0.033	<u>0.1-0.89</u> 0.31	<u>2.78-2.91</u> 2.85
4	<i>Moot Point</i> Мыс Мут(материк) (64.076°W, 65.2°S)	53-60, 10/154-10/161, 10/223-10/246	диорит	<u>0.06-1.55</u> 0.31	<u>0.017-0.057</u> 0.045	<u>0.3-0.8</u> 0.17	<u>2.74-2.83</u> 2.8
5	<i>Мыс Мут(остров)</i> (64.076°W, 65.2°S)	41-45 50-52	диорит	<u>0.05-0.62</u> 0.32	<u>0.032-0.066</u> 0.051	<u>0.04-0.24</u> 0.15	<u>2.74-2.82</u> 2.79
6	<i>Rusmussen Hut</i> хижина Расмуссен (64.084°W, 65.248°S)	10/117 – 10/126 10/148-10/154	лейкократовые граниты	<u>0.004-0.1</u> 0,047	<u>0.0017-0.01</u> 0.007	<u>0.07-0.5</u> 0.17	<u>2.57-2.62</u> 2.6
7	<i>хижина Расмуссен</i> (64.084°W, 65.248°S)	021-033	андезито-базальты	<u>0.008-0.3</u> 0,1	<u>0.0005-0.016</u> 0.008	<u>0.1-1.8</u> 0.6	<u>2.7-2.76</u> 2.72
8	<i>Rusmussen Island</i> остров Расмуссен (64.079°W, 65.258°S)	10/072 – 10/085 B215-B228	габбро	<u>0.43-4.4</u> 1.8	<u>0.007-0.08</u> 0.047	<u>0.26-2.67</u> 0.11	<u>2.76-2.89</u> 2.85
9	<i>Waddington Bay</i> залив Ваддингтон (64.05°W, 65.29°S)	96-101 105-106	гранодиорит	<u>0.18-0.9</u> 0.42	<u>0.02-0.04</u> 0.03	<u>0.2-0.5</u> 0.3	<u>2.65-2.71</u> 2.67
10	<i>Cape Tuxen</i> Мыс Туксен (64.11°W, 65.27°S)	140-153 A23-A27	габбро	<u>0.9-4.7</u> 3.0	<u>0.04-0.25</u> 0.13	<u>0.3-1.1</u> 0.6	<u>2.86-3.17</u> 2.94
11	<i>1 km Southern of Cape Tuxen</i> 1 км южнее м.Туксен (64.127°W, 65.273°S)	B045-B056	диорит (дайка)	<u>0.01-0.48</u> 0.07	<u>0.01-0.022</u> 0.017	<u>0.014-0.73</u> 0.1	<u>2.68-2.865</u> 2.71

(Продолжение таблицы – на 88, 89 стр.)

12	<i>1км южнее м.Туксен</i> (64.127°W, 65.273°S)	B057-B076	габбро	<u>0.83-8.37</u> 2.35	<u>0.04-0.1</u> 0.088	<u>0.28-1.5</u> 0.67	<u>2.87-3.07</u> 2.97
13	<i>Bottom of Demaria</i> <i>подошва г. Демария</i> (64.11°W, 65.28°S)	VSH05-VSH-20	гранодиорит	<u>0.022-0.26</u> 0.1	<u>0.017-0.024</u> 0.02	<u>0.03-0.27</u> 0.13	<u>2.635-2.68</u> 2.66
14	<i>Deliverance Point</i> <i>мыс Деливеренс</i> (64.08°W, 65.31°S)	84-94	гранодиорит	<u>0.14-0.4</u> 0.3	<u>0.014-0.04</u> 0.03	<u>0.12-0.49</u> 0.26	<u>2.62-2.65</u> 2.63
<b>Островные архипелаги</b>							
15	<i>Hovgaard Island</i> <i>остров Ховгард</i> (64.127°W, 65.132°S)	181-184 B210-B240	диорит	<u>0.014-0.54</u> 0.21	<u>0.014-0.054</u> 0.033	<u>0.015-0.36</u> 0.17	<u>2.72-2.79</u> 2.76
16	<i>Petermann Island</i> <i>остров Питерман</i> (64.15°W, 65.17°S)	107-120 A38-A45, 938-942	габбро	<u>0.22-3.1</u> 1.55	<u>0.004-0.22</u> 0.058	<u>0.2-3.8</u> 1.0	<u>2.8-3.04</u> 2.87
17	<i>Petermann Island</i> <i>остров Питерман</i> (64.139°W, 65.165°S)	B133-B140	габбро	<u>4.4-6.35</u> 5.37	<u>0.044-0.082</u> 0.062	<u>1.42-3.47</u> 2.24	<u>2.847-3.307</u> 2.92
18	<i>Petermann Island</i> <i>остров Питерман</i> (64.152°W, 65.165°S)	B165-B174	габбро- анортозиты	<u>0.285-5.03</u> 1.84	<u>0.066-0.137</u> 0.092	<u>0.06-1.24</u> 0.53	<u>2.9-3.1</u> 2.967
19	<i>Petermann Island</i> <i>остров Питерман</i> (64.15°W, 65.17°S)	933-937, 10/133-10/147	гранодиорит	<u>0.02-1.04</u> 0.11	<u>0.01-0.028</u> 0.02	<u>0.02-1.07</u> 0.13	<u>2.64-2.67</u> 2.656
20	<i>Petermann Island</i> <i>остров Питерман</i> (64.152°W, 65.166°S)	B113-B126	гранодиорит (тоналит)	<u>0.04-0.36</u> 0.1	<u>0.01-0.018</u> 0.013	<u>0.09-0.76</u> 0.21	<u>2.636-2.657</u> 2.647
21	<i>Berthelot Islands</i> <i>острова Берселот</i> (64.14°W, 65.324°S)	16-20 A58-A64	габбро	<u>0.2-1.07</u> 0.47	<u>0.02-0.052</u> 0.035	<u>0.17-0.65</u> 0.34	<u>2.82-2.858</u> 2.84
22	<i>Berthelot Islands</i> <i>острова Берселот</i> (64.143°W, 65.326°S)	001-015, B141- B150	гранодиорит, гранит-аплит	<u>0.06-0.73</u> 0.22	<u>0.013-0.035</u> 0.023	<u>0.07-1.06</u> 0.27	<u>2.61-2.67</u> 2.65
23	<i>Leopard, Black,</i> <i>Winter, Skua Islands</i> <i>Острова Блек,</i> <i>Леопард, Винтер,</i> <i>Скуа</i> (64.27°W, 65.25°S)	АО105-108, АО 506-520, АО 545-551	порфири- товый андезит	<u>0.03-1.2</u> 0.3	<u>0.001-0.08</u> 0.032	<u>0.02-1.1</u> 0.4	
24	<i>The Barchans</i> <i>острова Барчанс</i> (64.32°W, 65.23°S)	38-40 835-856	диорит	<u>0.05-0.4</u> 0.18	<u>0.017-0.04</u> 0.03	<u>0.035-0.34</u> 0.15	<u>2.69-2.76</u> 2.73
25	<i>Anagram Islands</i> <i>острова Анаграм</i> (64.32°W, 65.2°S)	A51-A57, 10/186-10/193 10/164-10/171	габбро	<u>1.6-4.9</u> 2.7	<u>0.065-0.1</u> 0.083	<u>0.38-1.5</u> 0.84	<u>2.85-2.92</u> 2.88
26	<i>Roca Islands</i> <i>острова Рока</i> (64.48°W, 65.19°S)	61-72	диорит	<u>0.05-0.53</u> 0.26	<u>0.015-0.084</u> 0.055	<u>0.02-0.2</u> 0.125	<u>2.64-2.84</u> 2.77
27	<i>Cruls Islands</i> <i>острова Крулс</i> (64.54°W, 65.19°S)	10/099-10/111	габбро	<u>0.39-0.98</u> 0.6	<u>0.006-0.03</u> 0.015	<u>0.39-2.83</u> 1.23	<u>2.91-2.95</u> 2.926



28	<i>Cruls Islands</i> <i>острова Крүлс</i> (64.54°W, 65.19°S)	071-083	гранодиорит	0.02-0.09 0.056	0.0245- 0.034 0.029	0.017-0.08 0.05	2.67-2.69 2.68
----	--	---------	-------------	--------------------	---------------------------	--------------------	-------------------

**Примечание:** ЕОН, магнитная восприимчивость, фактор Q, плотность – соответственно величины естественной остаточной намагниченности (А/м), магнитной восприимчивости (ед. СИ), фактора Q и плотности (г/см<sup>3</sup>), вверху приведен диапазон изменений величины, внизу – среднее значение по выборке. Географические названия приведены на английском языке в соответствии с картами Британского Адмиралтейства (с авторским русскоязычным переводом). Расположение пунктов отбора в соответствии с нумерацией № приведено на рис.1.

Привлечение другой магнитной характеристики – ЕОН (естественной остаточной намагниченности), которая в большинстве случаев рассматривается во взаимосвязи с МВ, даёт ценную петромагнитную информацию об условиях образования и изменения магнитных минералов пород, например, о температуре и др.

Как указывалось выше, основной закон распределения величин МВ и ЕОН в генетически единой группе образцов – логнормальный, а дисперсия величины lg(MB) может быть положена в основу выделения петромагнитных типов пород. Отношение f дисперсий lg(MB) и lg(ЕОН) может рассматриваться и использоваться как петрогенетический и формационный показатель, поскольку в «нормальных» изверженных породах дисперсия lg(ЕОН) всегда больше дисперсии lg(MB) (f<1). Это обусловлено тем, что ЕОН значительно более чувствительна к магнитным неоднородностям и физическим воздействиям на породы, чем МВ. Для нашей выборки (рис. 3) дисперсия МВ и ЕОН составляет соответственно 0.3 и 0.6, то есть f=0.5.

На рис. 4, А представлено распределение значений МВ в зависимости от величины ЕОН. Оно четко обусловлено концентрацией магнитных минералов, однако здесь также влияют и другие причины, связанные с образованием породы. В левой части рисунка распределение этих параметров для слабомагнитных образцов в первом приближении указывает на прямую связь, в то время как в правой части, характеризующей наиболее магнитные разновидности пород, большим величинам ЕОН соответствуют относительно невысокие значения МВ.

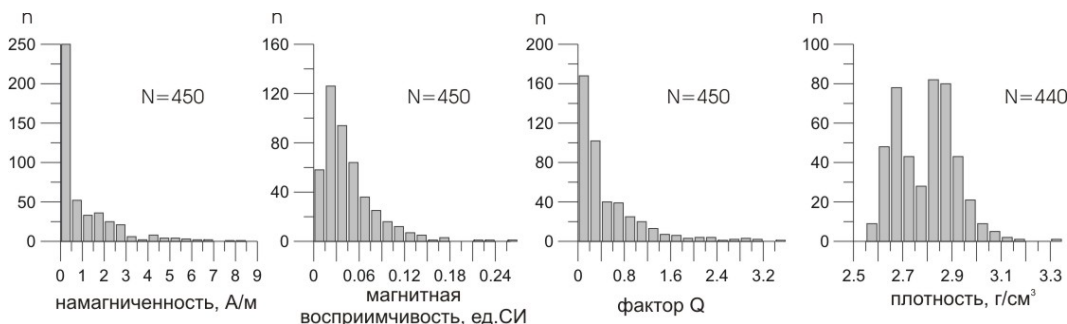


Рис. 3. Магнитные и плотностные характеристики магматических пород в районе архипелага Аргентинские острова и прилегающей территории Антарктического полуострова; n, N – число образцов, по которым выполнены измерения.

На рис. 4, Б представлено распределение значений МВ и плотности. Очевидна общая закономерность в соотношении этих параметров – с увеличением плотности увеличиваются значения магнитной восприимчивости, притом для относительно слабо- (<0.05 ед. СИ) и сильно- (>0.05 ед. СИ) магнитных образцов закономерности изменения разные: для последних характерен с увеличением плотности более резкий рост значений МВ.

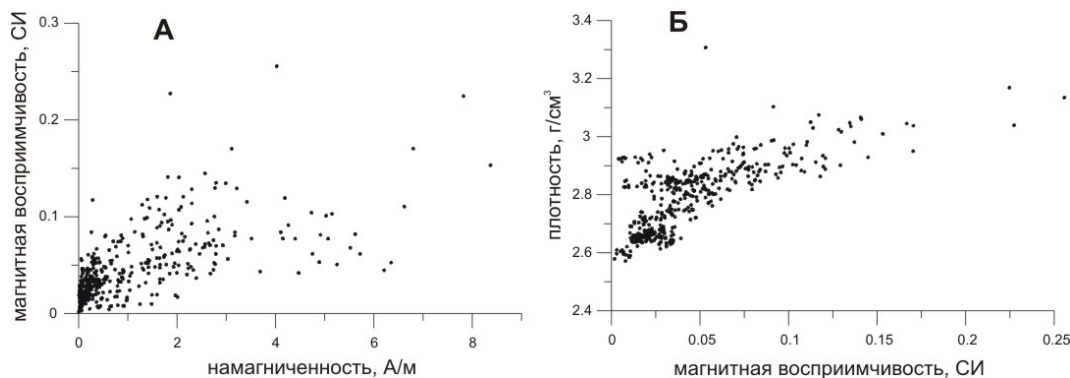


Рис. 4, А – распределение значений естественной остаточной намагниченности и магнитной восприимчивости. Б – распределение значений магнитной восприимчивости и плотности.

Столь широкий разброс значений исследуемых параметров соответствует широкому диапазону колебаний  $\text{SiO}_2$  в образцах – от 40 до 70 % (рис. 2). Как отмечалось выше, на диаграмме TAS условно можно выделить три поля максимальной концентрации, которые относятся к группам габброидов, диоритов и гранодиоритов (гранитов). В соответствии с таким подразделением образцы пород были отнесены к соответствующим группам, и далее на рис. 5 приведены диаграммы магнитных и плотностных характеристик для каждой из групп, а также некоторые статистические параметры.

Среди наших образцов более 40% относятся к группе габброидов. Они характеризуются наибольшими значениями всех параметров и их относительно большим разбросом относительно средних значений, которые для ЕОН, МВ, фактора Q и плотности составляют соответственно 2.08 А/м, 0.068 СИ, 0.95 и 2.9 г/см<sup>3</sup>. Отношение дисперсий  $\lg(\text{МВ})$  и  $\lg(\text{ЕОН})$  здесь равно единице ( $f=1$ ). Вероятно это обусловлено тем, что часть образцов имеет достаточно большие значения ЕОН (более 4-5 А/м), что связано с повышенной концентрацией в них магнетита, которое достигает 8-10%, а в некоторых образцах габбро с о-вов Анаграм – до 30% [Артеменко и др., 2009].

Образцы, относящиеся к группе диоритов (около 30% всех образцов), характеризуются значительно меньшими величинами всех параметров. Они имеют низкие значения фактора Q (в среднем 0.2) и почти на порядок более низкие значения ЕОН (в сравнении с породами группы габбро). По плотности в диапазоне 2.8-2.85 г/см<sup>3</sup> они частично перекрываются с образцами из группы габброидов.

Наименьшими величинами исследуемых параметров характеризуются образцы, относящиеся по содержанию  $\text{SiO}_2$  к гранитоидам. Они имеют минимальный разброс параметров относительно средних значений, наиболее узкий диапазон изменения плотности (среднее значение 2.65 г/см<sup>3</sup>), по фактору Q не отличаются от диоритов, но относительно последних имеют вдвое меньшие средние значения ЕОН и МВ. Параметр  $f$  и для диоритов, и для гранодиоритов  $<1$  (равен 0.41 и 0.58 соответственно).

Следует отметить, что некоторые образцы визуально невозможно было однозначно отнести, например, к гранодиоритам либо диоритам, а данные по геохимии для них отсутствовали. С этим может быть связано перекрытие значений на диаграммах для разных групп пород, однако на общих закономерностях это не отражается. Отличие параметров для трёх вышеописанных групп наглядно демонстрирует рис. 5, где значения параметров представлены в едином горизонтальном масштабе.

На рис. 6 отдельно приведены гистограммы распределения ЕОН, МВ и плотности для вулканогенных пород, которые в исследуемом районе представлены широким спектром – липаритами, дацитами, андезитами, туфами. Их возраст – от средне-верхнеюрского (пред-

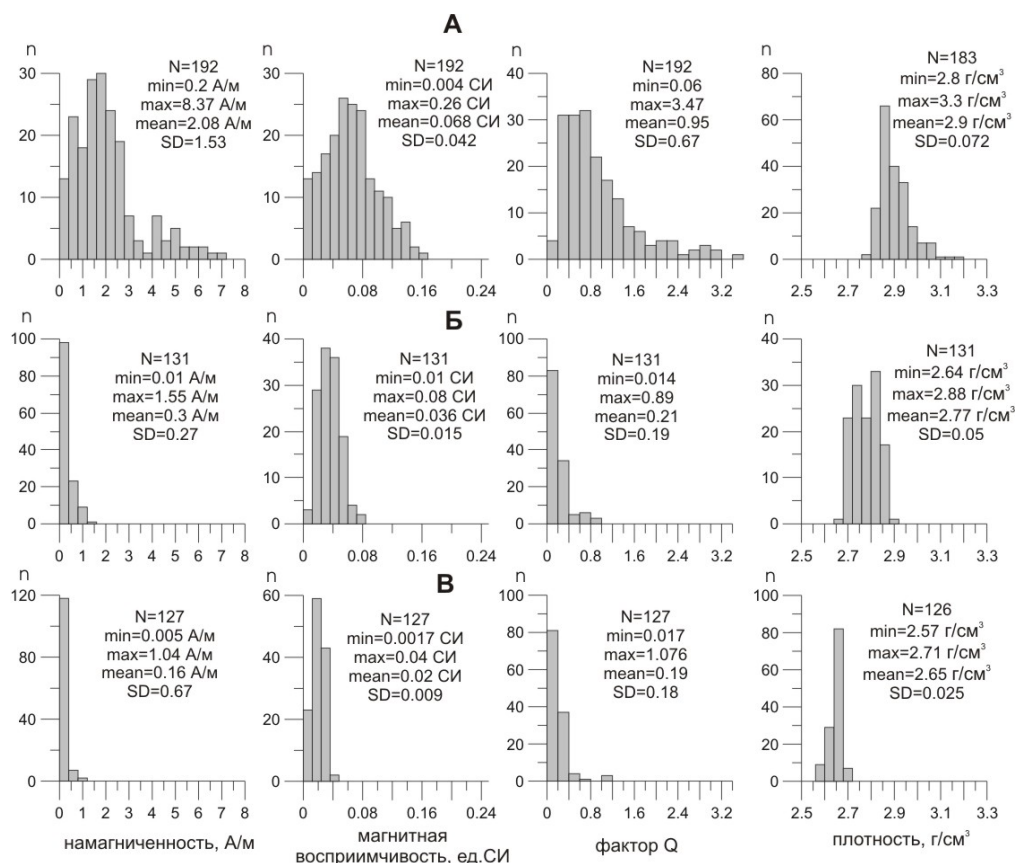


Рис. 5. Диаграммы магнитных и плотностных характеристик для пород группы габбро (А), диоритов (Б) и гранодиоритов – гранитов (В) групп. Для каждой диаграммы приведены статистические параметры: N – количество измеренных образцов, min – минимальное значение, max – максимальное значение, mean – среднее значение, SD – стандартное отклонение.

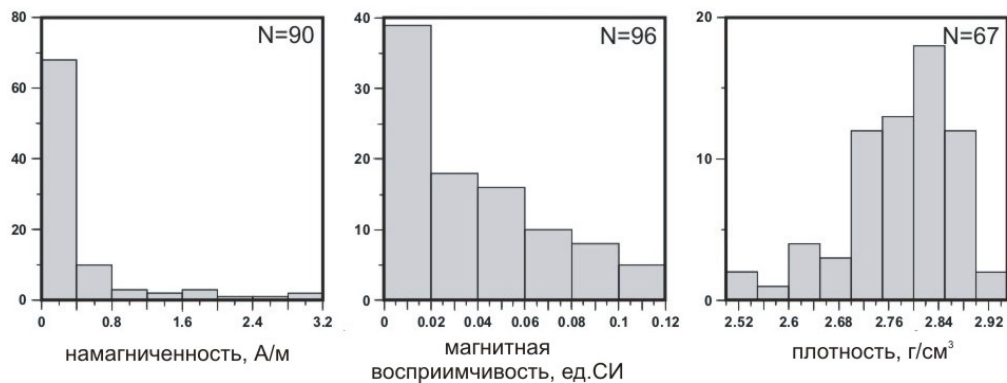


Рис. 6. Магнитные и плотностные характеристики вулканогенных пород в районе архипелага Аргентинские острова и прилегающей территории Антарктического полуострова.

ставлены лавами андезитов, дацитов и пирокластическими породами мощностью более 1000 м, распространенными вдоль пролива Пенола и канала Лемаер, а также на близлежащих островах) до условно третичного (породы этой группы представлены

порфиrowыми андезитами и порфиrowыми авгит-микродиоритами, распространены в виде лавовых потоков и даек, которые имеют незначительные вторичные изменения, их возраст определён ненадежно) [Бахмутов, 1998]. В целом для этих пород величины ЕОН и МВ близки к значениям, характерным для гранодиоритов, однако плотностные характеристики со средними значениями в диапазоне 2.75-2.85 г/см<sup>3</sup> более близки к значениям, характерным для основных пород. Например, для базальтов у подножия г. Скотт среднее значение плотности составляет 2.77 г/см<sup>3</sup>.

## 5. Заключение

В результате аналитических исследований коллекции более чем 500 образцов мезозойских и палеоценовых интрузивных и вулканогенных пород, отобранных в западной части Антарктического полуострова, получена новая информация о магнитных и плотностных параметрах разных породообразующих комплексов. Исследованные магматические породы характеризуются широким диапазоном значений как магнитных (МВ – от 0.0016 до 0.26 ед. СИ, ЕОН – от 0.0045 до 8.37 А/м), так и плотностных параметров (от 2.57 до 3.3 г/см<sup>3</sup>).

Различия в плотностных и магнитных характеристиках пород разных петрографических групп укладываются в общие закономерности их изменений в породах кислого, среднего и основного составов. Соответственно средние значения плотности составляют 2.65, 2.77 и 2.9 г/см<sup>3</sup>, магнитной восприимчивости – 0.02, 0.036 и 0.068 ед. СИ, естественной остаточной намагниченности – 0.16, 0.3 и 2.08 А/м.

Среднестатистические характеристики, полученные для разных петрографических групп пород на разных участках исследуемой территории, являются базовым материалом для параметризации гравитационных и магнитных моделей, рассчитываемых по аномалиям потенциальных полей. Построение комплексных геолого-геофизических моделей глубинного строения земной коры и верхней мантии Западной Антарктики является ключом для понимания процессов их эволюции. Континентальная окраина Антарктического полуострова дает уникальную возможность исследовать глубинную структуру континентальных окраин и магматических дуг, так как она покрыта сетью сейсмических рефракционных профилей и характеризуется сильными гравитационными и магнитными аномалиями. Примером объединения результатов глубинных сейсмических исследований с результатами моделирования потенциальных полей (магнитного и гравитационного) является построение модели структуры литосферы АП вдоль двух интерпретационных профилей [Yegorova et al., 2011], что позволило предложить новую петрологическую модель континентальной окраины и сделать обоснованные выводы относительно её зарождения, эволюции и коллапса.

Дальнейшим шагом является построение модели глубинного строения земной коры района, прилегающего к УАС Академик Вернадский. В настоящее время здесь завершаются магнитная съёмка и построение карты аномального магнитного поля. Для её интерпретации и последующего построения магнитных и плотностных моделей земной коры значение нового фактического материала, приведенного в настоящей статье, трудно переоценить.

## Список литературы

Артеменко Г.В., Бахмутов В.Г., Гладкочуб Д.П., Самборская И.А. Геохимия и рудоносность интрузий габброидов Антарктического полуострова // Тези. «III Міжнар. полярний рік 2007/2008: результати та перспективи». IV Міжнародна Антарктична конференція. – Київ, Україна. – 12-14 травня 2009. – С. 28.

Бахмутов В.Г. Геологический обзор архипелага Аргентинские острова и прилегающей территории Антарктического полуострова // Бюлл. УАЦ. – 1998. – Вип. 2. С. 77–84.

Бахмутов В.Г., Гладкочуб Д.П., Шпыра В.В. Возрастная позиция, геодинамическая специфика и палеомагнетизм интрузивных комплексов западного побережья Антарктического полуострова // Геофиз. журн. – 2013. – 35, №3. С. 3–30.

**Буртний П.А., Карнаухова Е.Е., Корчин В.А.,** Савенко Б.Я., Шаповал В. И., Шепель С.И. Физические характеристики магматических пород района Антарктической станции “Академик Вернадский” // Украинский антарктический журнал. – 2003. – № 1. С. 47–53.

**Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Бахмутов В.Г.** Особенности состава, возраст и модель образования габброидов Андийского комплекса (мыс Туксен, Западная Антарктика) // Украинский Антарктический журнал. – 2012. – № 10-11. С. 39–47.

**Корчин В. А., Буртний П. А., Карнаухова Е. Е.,** Нех А. С. Упруго-плотностные характеристики горных пород западного побережья Антарктического полуострова района станции “Академик Вернадский” // Украинский Антарктический журнал. – 2004. – № 2. С. 66–72.

**Лебедев Т.С., Шепель С.И., Корчин В.А.,** Савенко Б.Я., Шаповал В.И., Буртний П.А., Карнаухова Е.Е. Петрофизическая характеристика пород западного побережья Антарктического полуострова и прилегающих островов в районе станции “Академик Вернадский” // Геофизический журнал. – 2002. – 24, № 6. – С. 93–115.

**Савенко Б.Я., Шепель С.И., Буртний П.А.,** Карнаухова Е.Е. Анализ петромагнитных характеристик горных пород Антарктического побережья района станции “Академик Вернадский” // Геология и полезные ископаемые Мирового океана. – 2005. – № 2. С. 101–110.

**Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (Петрофизика).** Справочник геофизика / Под ред. Н.Б. Дортман. – 2-е изд. – М. : Недра. – 1984. – 455 с.

**Шолло Л.Е.** Использование магнетизма горных пород для решения геологических задач: Л., Недра. – 1977. – 182 с.

**Curtis R.** The petrology of the Graham Coast, Graham Land // Br. Antarct. Surv. Sci. Rep. – 1966. – 50. – P. 1–51.

**Elliot D.H.** The petrology of the Argentine Islands // British Antarctic Survey Rep. – 1964. – 41 p.

**Garrett, S.W.** Interpretation of reconnaissance gravity and aeromagnetic surveys of the Antarctic Peninsula // J. geophys. Res. – 1990. 95. 6759–6777.

**Jin, Y.K., Larter, R.D., Kim, Y.,** Nam, S.H. & Kim, K.J. Post-subduction margin structures along Boyd Strait, Antarctic Peninsula // Tectonophysics. – 2002. – 346 (3-4). P. 187–200.

**Larter R.D. and Barker P.F.** Effects of ridge crest-trench interaction on Antarctic-Phoenix spreading: forces on a young subducting plate // J. Geophys. Res. – 1991. – 96 (B12): P. 19583–19607. – doi:10.1029/91JB02053.

**Larter, R.D., Rebesco, M., Venneste, L.E.,** Gambôa, L.A.P. and Barker P.F. Cenozoic tectonic, sedimentary and glacial history of the continental shelf west of Graham Land, Antarctic Peninsula. – In: Barker, P.F., Cooper, A.K. (Eds.). – Geology and Seismic Stratigraphy of the Antarctic Margin. – Part 2. – Antarct. Res. Ser. – 1997. – Vol. 71. – AGU, Washington, DC. – P. 1–27.

**Le Maitre, R.W., Bateman, P., Dudek, A.,** et al. A Classification of Igneous Rocks and Glossary of Terms. Recommendations of the International Union of Geological Sciences Subcommittee on the Systematics of Igneous Rocks. – Blackwell, Oxford. – 1989.

**Leat P.T., Scarrow J.H. and Millar I.L.** On the Antarctic Peninsula batholith // Geol. Mag. – 1995. – 132 (4). P. 399–412.

**Storey, B.C. and Garrett, S.W.** Crustal growth of the Antarctic Peninsula by accretion, magmatism and extension // Geol. Mag. – 1985. 122. P. 5–14.

**Tangeman J.A., Mukasa S.B. and Grunow A.M.** Zircon U-Pb geochronology of plutonic rocks from the Antarctic Peninsula: Confirmation of the presence of unexposed Paleozoic crust // Tectonics. – 1996. – V. 15, № 6. – P. 1309–1324. – doi:10.1029/96tc00840.

**Thompson M.R.A. and Pankhurst R.J.** Age of Post-Gondwanian calc-alkaline volcanism in the Antarctic Peninsula region. – In: Antarctic Earth Science (eds. R.L. Oliver, P.R. James and J.B. Jago). – Canberra: Australian Academy of Science and Cambridge; Cambridge University Press. 1983. P. 328–333.

**Willan R.C. and Kelley S.P.** Mafic dike swarms in the South Shetland Islands volcanic arc: unravelling multi-episodic magmatism related to subduction and continental rifting // J. Geophys. Res. – 1999. 104 (B10). P. 23051–23068.

**Yegorova T., Bakhmutov V., Janik T.,** Grag M. Joint geophysical and petrological models for the lithosphere structure of the Antarctic Peninsula continental margin // Geophys. J. Int. 2011. 184. P. 90–110. – doi:111/j.1365-246X.2010.04867.x.