

<https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.06.046>

УДК 528 + 550.837 + 553.98

**В.Г. Бахмутов¹, В.Д. Соловьев¹,
Н.А. Якимчук², И.Н. Корчагин¹**

¹ Институт геофизики им. С.И. Субботина НАН Украины, Киев

² Институт прикладных проблем экологии, геофизики и геохимии, Киев

E-mail: solvalera@ukr.net, yakymchuk@gmail.com

Глубинные расплавы крупных вулканов и вулканических провинций Западной Антарктиды: новые экспериментальные данные

Представлено членом-корреспондентом НАН Украины Н.А. Якимчуком

Получены новые экспериментальные данные о глубинном распределении частотно-резонансных характеристик пород для отдельных вулканов и вулканических провинций Западной Антарктиды и Антарктики. Результаты исследований показывают существование в Западной Антарктиде сложной магмо-газо-флюидной системы, состоящей из ряда магматических камер, питаемых магмами, поднятыми из мантии в промежуточные (коровые) зоны накопления. Для вулканических провинций выделены глубинные границы положения корней каналов (вулканов) разного возраста — 95, 217, 470 и 723 км, что свидетельствует о существенной роли многофазной импульсной вулканической деятельности (по вертикальным каналам миграции глубинных флюидов) в формировании тектонического разнообразия и эволюции структур континентальных окраин Антарктического региона. По данным частотно-резонансных исследований каналы с разной глубиной расплава заполнены базальтами, кимберлитами, ультрамафитами и различными группами осадочных пород. Наличие вулканических построек с корнями на различных глубинах позволяет предположить наличие их закономерной связи с процессами тектонической активизации в этих регионах, которые происходили за последние 500 млн лет.

Использование эталонных частот для разных типов известных пород и минералов позволяет применять частотно-резонансные методы для изучения глубинного строения нашей планеты и решения проблем поисков многих видов полезных ископаемых.

Ключевые слова: *Западная Антарктида, глубинное строение, море Росса, Эребус, вулканы, прямые поиски, мобильная технология, обработка данных ДЗЗ.*

Изучение глубинного строения эруптивных каналов отдельных вулканов и магматических систем вулканических провинций имеет важное значение для оценки роли вулканизма в процессах формирования структуры геосфер Земли.

Цитування: Бахмутов В.Г., Соловьев В.Д., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н. Глубинные расплавы крупных вулканов и вулканических провинций Западной Антарктиды: новые экспериментальные данные. *Допов. Нац. акад. наук Укр.* 2020. № 6. С. 46–53. <https://doi.org/10.15407/dopovidi2020.00.046>

Новые экспериментальные данные о возможной глубине магматических очагов вулканических структур и провинций Западной Антарктики были получены в результате проведения сезонных геофизических работ Украинских антарктических экспедиций (УАЭ) разных лет [1, 3–5].

Геофизические измерения во время проведения сезонных работ УАЭ выполнялись с использованием мобильной прямо поисковой технологии, включающей флюксометрическую съемку, метод ВЭРЗ, а также метод частотно-резонансной обработки и интерпретации данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) [1–3]. В модифицированных версиях методов вертикального зондирования и частотно-резонансной обработки спутниковых снимков и фотографий использовались коллекции минералов и горных пород. Проведенные исследования позволили получить первые экспериментальные данные о глубинном распределении частотно-резонансных характеристик пород для отдельных вулканов и вулканических провинций Западной Антарктиды и Антарктики [4, 5].

О вулканах Западной Антарктиды и Антарктики. В Западной Антарктиде и в районе Антарктического полуострова обнаружено более 140 вулканов [13], значительная их часть относится к неактивным вулканическим структурам, погребенным под мощной толщей льда и сгруппированным в виде отдельных скоплений (вулканических провинций) вдоль побережья континента (рис. 1).

Вулканические провинции в Западной Антарктиде могут отражать наличие локальных мантийных плюмов и разноуровневых магматических очагов, часть из которых имеет генетическую связь с глубинными расплавами Западно-Антарктической рифтовой системы [7, 9, 11–14].

Новые экспериментальные данные позволили получить частотно-резонансные характеристики пород, заполняющих глубинные каналы отдельных структур, оценить глубины расположения корней вулканических построек и расплавов — источников магматизма вулканических провинций [4, 5].

Вулканические провинции Амудсен и Земли Мэри Берд. Для вулканических провинций Амудсен и Земли Мэри Берд (см. рис. 1) по результатам глубинного частотно-резонансного зондирования разрезов были получены осредненные данные о положении глубинных корней многочисленных (более 100) вулканических структур, расположенных на два километра ниже уровня ледяного покрова побережья Антарктиды [13]. Корни подводящих каналов в этом районе расположены в верхней мантии и могут достигать глубины 548–580 км и более [5].

Ниже приведены схематические разрезы глубинного строения отдельных сегментов Западно-Антарктической рифтовой системы, которые свидетельствуют о гетероген-



Рис. 1. Схематическая карта положения отдельных вулканов и вулканических провинций в Западной Антарктиде, по [13]

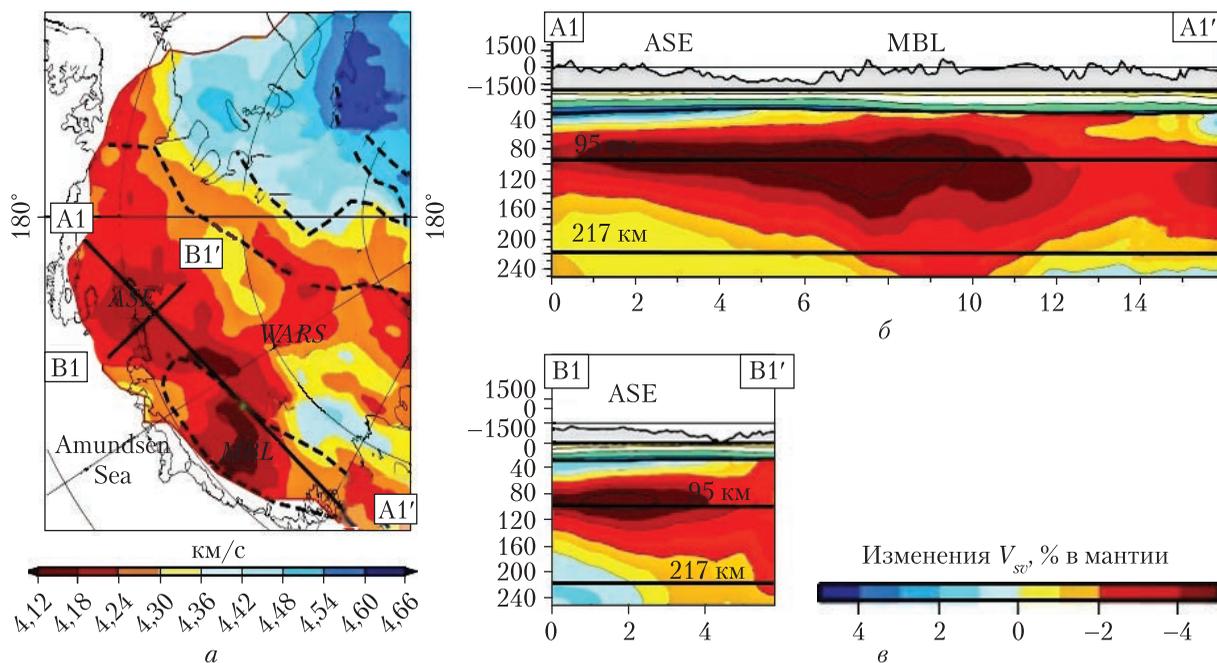


Рис. 2. Распределение средних значений V_s для глубины 80–120 км (*a*); структура верхней мантии (*б* и *в*) Земли Мэри Берд (MBL) и побережья моря Амундсена (ASE), по [12]. Значения скорости V_s в мантии представлены в виде изменений (%) относительно средних значений по профилям для всего региона. WARS – Западно-Антарктическая рифтовая система. Показаны границы раздела (95, 217 км) по данным частотных зондирований

ности верхней мантии по данным новейших сейсмических исследований в этом регионе [7, 9, 12–14].

В моделях верхней мантии (профили А–А1' и В–В1', рис. 2) побережья западной Антарктиды выделены скоростные неоднородности на глубинах до 250 км. Предполагается, что аномальное распределение скоростных аномалий объясняется наличием крупных глубинных тепловых аномалий [12].

Расположение подводящих мантийных каналов вулканической провинции Земли Мэри Берд (рис.2) указывает на существование глубинных флюидо-магматических расплавов, имеющих связь с центральной зоной Западно-Антарктической рифтовой системы – одной из наиболее выраженных континентальных рифтовых зон мира.

Для вулканических структур Земли Мэри Берд полученные данные свидетельствуют (в отличие от структур провинции Амундсен) о наличии в глубинном разрезе широкого спектра магматических пород (от сиенитов до ультрамафитов). Возраст пород мантийного плюма Земли Мэри Берд оценивается порядка 100 млн лет, а возраст вулканических образований всего региона достигает 500 млн лет [11].

Вулканическая провинция Земли Мэри Берд могла сформироваться как часть “мантийного плюма” и региональной рифтовой структуры. В этом случае масштабность формирования и проявления новых вулканических построек зависит от особенностей поведения не только приповерхностных магматических резервуаров, но также и от частоты и энергии импульсных извержений региональных глубинных расплавов.

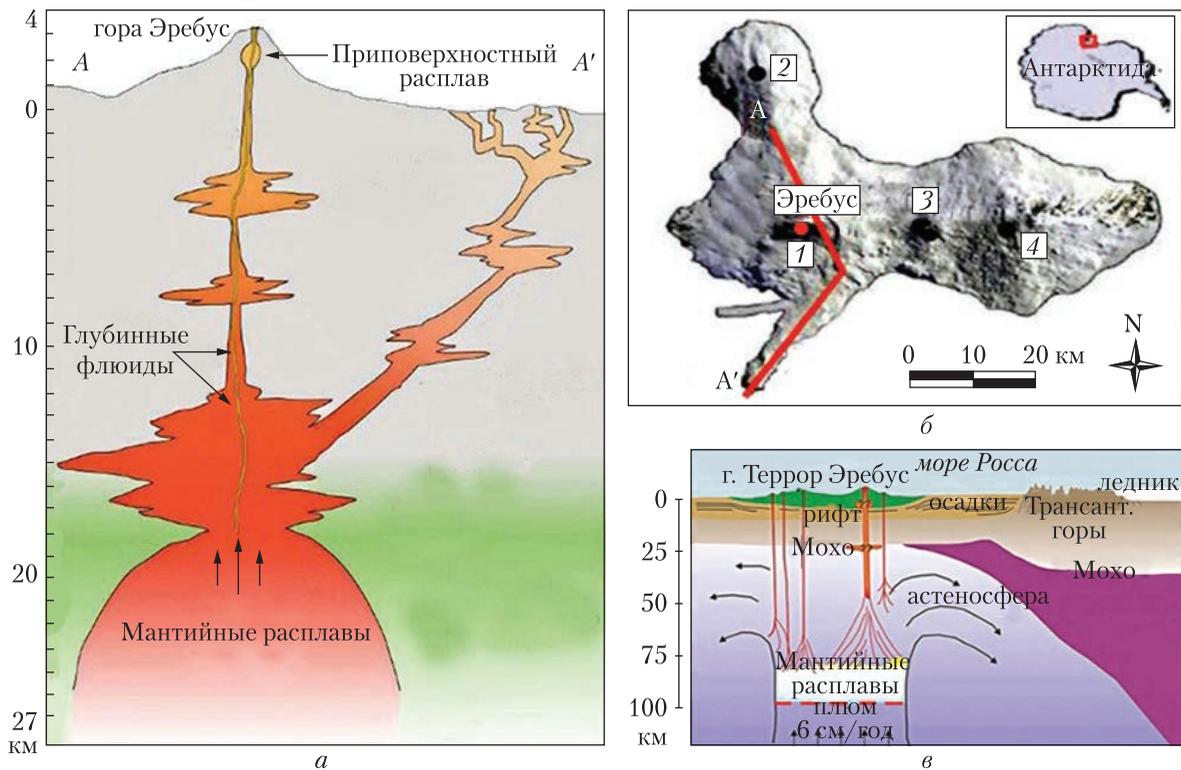


Рис. 3. Схематический разрез земной коры (а) вулкана Эребус вдоль профиля А—А' и положение профиля А—А' на острове Росса (б), по [10]; (в) — глубокий разрез через вулкан Эребус, по [9]. Вулканы острова Росса: 1 — Эребус; 2 — Берд; 3 — Терра Нова; 4 — Террор. Красная пунктирная линия — верхняя граница положения корней вулканов острова Росса по данным частотных исследований

Осредненные по площади вулканических провинций результаты частотного анализа не позволяют дифференцировать глубинное положение каналов миграции в разрезе кора — мантия структур Земли Мэри Берд и соотнести их с важнейшими тектоническими этапами развития региона. Поэтому особенности структуры верхней мантии и природа глубинного вулканизма в этом районе остается предметом дискуссий [6, 11].

Провинция Эребус. Вулканическая провинция Эребус расположена вблизи антарктического побережья (район моря Росса, см. рис. 1). Она включает ряд вулканических структур, наиболее крупными из которых являются недействующие в настоящее время вулканы Террор, Терра Нова и Берд, а также крупный (его объем превышает 1000 км²) активный вулкан Эребус (рис. 3). Его возраст не превышает 1млн лет. Высота этого вулкана равна 3794 м, диаметр кратера — 805 м, а глубина до открытой поверхности расплава (лавого озера) — 274 м. Последнее извержение вулкана Эребус было в 2011 г.

Гора Террор — это крупный базальтовый вулкан, его возраст — 0,8—1,8 млн лет [7, 10]. Вулканы острова Росс считают частью проявления обширной горячей точки в западной части моря Росса [7, 12]. Представленные модели земной коры и литосферы вулканической провинции Эребус (см. рис. 3) отражают наличие в разрезах магматических расплавов и зон промежуточной кристаллизации [10]. Существованием корово-мантийных распла-

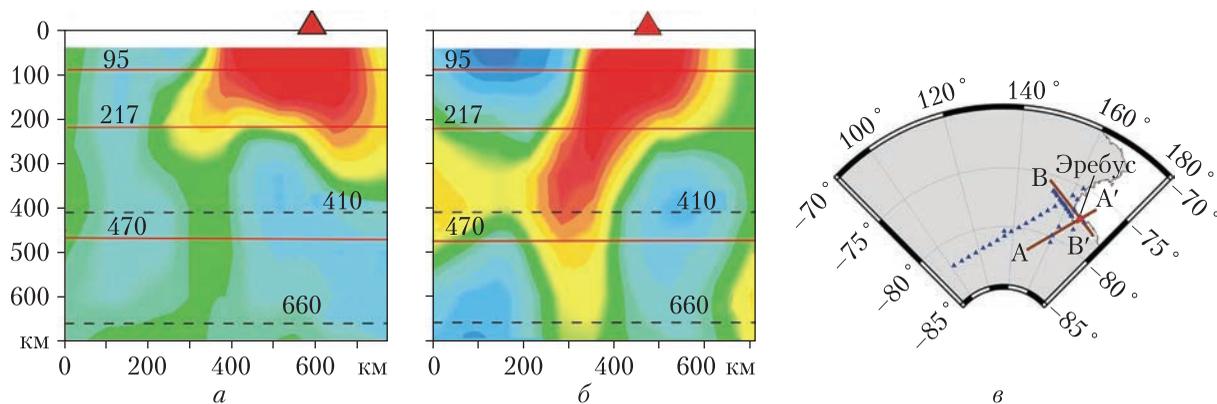


Рис. 4. Глубинные скоростные разрезы вдоль профилей AA' (а) и BB' (б) через вулкан Эребус, по [7]. Показана шкала аномальных изменений Р-волн в разрезе (в %). Пунктирные линии на глубине 410 и 660 км обозначают положение границ переходной зоны от верхней к нижней мантии. Сплошные красные линии (95, 217, 470, 723 км) – возможные границы корней глубинных каналов разного возраста, полученные по результатам применения технологии частотно-резонансной обработки спутниковых данных. в – положение профилей

вов можно объяснить активные тектонические процессы в регионе и эволюцию состава флюидо-магматических расплавов, возраст которых превышает 500 млн лет [7, 8, 10, 11].

Моделирование структуры верхней мантии [7] показало, что неоднородности распределения скоростных параметров под вулканом Эребус (рис. 4) могут быть связаны с наличием расплавов, корни которых достигают глубины 410 и 660 км, т.е. находятся в зоне перехода от верхней к нижней мантии. Вполне вероятным представляется наличие глубинных связей выделенных расплавов со структурными элементами Западно-Антарктической рифтовой системы.

Результаты частотно-резонансной обработки данных для центральной части вулканической провинции Эребус показали, что корни каналов (вулканов) разного возраста расположены на глубинах 95, 217, 470 и 723 км. Для глубин 95 и 217 км получены отклики от пород группы сиенитов и трахитов, а также от лампрофировых пород. Для корней на глубине 470 и 723 км получены локальные отклики от группы пород габбро-базальтового состава.

Сравнение ранее полученных результатов изучения структуры верхней мантии по сейсмическим данным с интегральными частотно-резонансными характеристиками глубинных разрезов вулканической провинции Эребус показывает, что мантийные неоднородности различного состава распространяются на глубины, превышающие 700 км, что подтверждает не только локальный, но и региональный характер формирования крупных вулканических построек.

Впервые выявленные закономерности глубинного распределения частотно-резонансных характеристик пород литосферы и верхней мантии могут отражать временную и вещественную дифференциацию процессов тектонической активизации, в результате которых в этих регионах сформировались многочисленные магматические тела разного возраста.

Обсуждение результатов. Получены новые экспериментальные данные о глубинном распределении частотно-резонансных характеристик пород для отдельных вулканов и вул-

канических провинций Западной Антарктиды и Антарктики. Определены глубины расположения корней вулканических построек и типы пород, заполняющие глубинные каналы крупных вулканов.

Результаты исследований показывают существование в Западной Антарктиде сложной магмо-газо-флюидной системы, состоящей из ряда магматических камер, питаемых магмами, поднятыми из мантии в промежуточные (коровые) зоны накопления. Корни многих вулканов располагаются в расплавленном слое пород на глубине 195–217 км. Эта зона расплава может «прорываться» породами более глубоких каналов миграции флюидов. Для вулканических провинций выделены глубинные границы положения корней каналов (вулканов) разного возраста — 95, 217, 470 и 723 км. Это свидетельствует о существенной роли многофазной импульсной вулканической деятельности (по вертикальным каналам миграции глубинных флюидов) в формировании тектонического разнообразия и эволюции структур континентальных окраин Антарктического региона. Наличие вулканических построек с корнями на различных глубинах позволяет предположить их закономерную связь с процессами тектонической активизации в этих регионах, которые происходили за последние 500 млн лет.

Использование эталонных частот для разных типов известных пород и минералов позволяет применять частотно-резонансные методы для изучения глубинного строения нашей планеты и решения проблем поисков многих видов полезных ископаемых

ЦИТИРОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

1. Бахмутов В.Г., Третьяк К.Р., Максимчук В.Ю. та ін. Структура і динаміка геофізичних полів у Західній Антарктиці. Львів: Вид-во “Львівська політехніка”, 2017. 336 с.
2. Левашов С.П., Якимчук Н.А., Корчагин И.Н. Частотно-резонансный принцип, мобильная геоэлектрическая технология: новая парадигма геофизических исследований. *Геофиз. журн.* 2012. **34**, № 4. С. 167–176.
3. Удинцев Г.Б., Береснев А.Ф., Куренцова и др. Пролит Дрейка и море Скоша — океанские ворота Западной Антарктики. Строение и история развития литосферы. Москва: Paulsen. 2010. С. 66–90.
4. Якимчук Н.А., Корчагин И.Н. Изучение внутренней структуры вулканических комплексов разного типа по результатам частотно-резонансной обработки спутниковых снимков и фотоснимков. *Геоинформатика*. 2019. № 4. С. 5–18.
5. Якимчук Н.А., Корчагин И.Н., Бахмутов В.Г., Соловьев В.Д. Геофизические исследования в Украинской морской антарктической экспедиции 2018 г.: мобильная измерительная аппаратура, инновационные прямопоисковые методы, новые результаты. *Геоинформатика*. 2019. № 1. С. 5–27.
6. Daya J.M.D., Harvey R. P., Hilton D.R. Melt-modified lithosphere beneath Ross Island and its role in the tectono-magmatic evolution of the West Antarctic Rift System. *Chemical Geology*. 2019. **518**, 20 July. P. 45–54. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.04.012>
7. Gupta S., Zhao D., Rai S.S. Seismic imaging of the upper mantle under the Erebus hotspot in Antarctica. *Gondwana research*. 2009. 16. P. 109–118.
8. Haeger C., Kaban M., Tesauro M. 3D Density, Thermal, and Compositional Model of the Antarctic Lithosphere and Implications for Its Evolution. *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2019. **20**, Iss. 2, P. 688–707. <https://doi.org/10.1029/2018GC008033>
9. Hill G.J. On the Use of Electromagnetics for Earth Imaging of the Polar Regions. *Surveys in Geophysics*. 2019 August. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09570-8>
10. Iakovino K. Linking subsurface to surface degassing at active volcanoes: A thermodynamic model with applications to Erebus volcano. *ESPL*. 2015. **431**. P. 59–74.

11. Rocchi S., Armienti P., D’Orazio M. et al. Cenozoic magmatism in the western Ross Embayment: Role of mantle plume versus plate dynamics in the development of the West Antarctic Rift System. *JGR*, 2002. **107**, N. B9, P. 1–22. 2195. <https://doi.org/10.1029/2001JB000515>
12. Shen W., Wiens D.A., Anandakrishnan S. et al., The Crust and Upper Mantle Structure of Central and West Antarctica From Bayesian Inversion of Rayleigh Wave and Receiver Functions. *JGR: Solid Earth*. 2018. **123**. P. 7824–7849. <https://doi.org/10.1029/2017JB015346>
13. Vries M.V.W., Bingham R.G., Hein A.S. A new volcanic province: an inventory of subglacial volcanoes in West Antarctica Geological Society. London: Special Publications. 2017. 461. P. 231–248. <https://doi.org/10.1144/SP461.7>
14. Winberry J.P., Anandakrishnan S. Crustal structure of the West Antarctic rift system and Marie Byrd Land hotspot. *Geology*. 2004. 32(11). P. 977–980. <https://doi.org/10.1130/g20768.1>

Поступило в редакцию 14.04.2020

REFERENCES

1. Bakhmutov, V. G., Tretyak, K. R., Maksimchuk, V. Yu. et al., in. (2017). The structure and dynamics of geophysical fields at West Antarctica. Lviv (in Ukrainian).
2. Levashov, S. P., Yakimchuk, N. A. & Korchagin, I. N. (2012). Frequency-resonance principle, mobile geoelectric technology: a new paradigm of geophysical research. *Geophysical journal*. 34, No. 4, pp. 167-176 (in Russian).
3. Udintsev, G. B., Beresnev, A. F., Kurentsova, N. A. et al. (2010). Drake Strait and the Skosha Sea – ocean gate of Western Antarctica. Structure and history of the development of the lithosphere. Moscow: Paulsen (in Russian).
4. Yakimchuk, N. A. & Korchagin, I. N. (2019). The study of the internal structure of volcanic complexes of various types according to the results of frequency-resonance processing of satellite images and photographs. *Geoinformatics*, No. 4, pp. 5-18 (in Russian).
5. Yakimchuk, N. A., Korchagin, I. N., Bakhmutov, V. G. & Soloviev, V. D. (2019). Geophysical surveys in the Ukrainian Antarctic Expedition 2018: mobile measuring equipment, innovative direct search methods, new results. *Geoinformatika*, No. 1, pp. 5-27 (in Russian).
6. Daya, J. M. D., Harveyb, R. P. & Hiltona, D. R. (2019). Melt-modified lithosphere beneath Ross Island and its role in the tectono-magmatic evolution of the West Antarctic Rift System. *Chemical Geology*, 518, pp. 45-54. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2019.04.012>
7. Gupta, S., Zhao, D. & Rai, S. S. (2009). Seismic imaging of the upper mantle under the Erebus hotspot in Antarctica. *Gondwana research*, 16, pp. 109-118.
8. Haeger, C., Kaban, M. & Tesauro, M. (2019). 3’D Density, Thermal, and Compositional Model of the Antarctic Lithosphere and Implications for Its Evolution. *Geochemistry, Geophysics. Geosystems*, 20, Iss. 2, pp. 688-707. <https://doi.org/10.1029/2018GC008033>
9. Hill, G. J. (2019). On the Use of Electromagnetics for Earth Imaging of the Polar Regions. *Surveys in Geophysics*. <https://doi.org/10.1007/s10712-019-09570-8>
10. Iakovino, K. (2015). Linking subsurface to surface degassing at active volcanoes: Athermodynamic model with applications to Erebus volcano. *ESPL*, 431, pp. 59-74.
11. Rocchi, S., Armienti, P., D’Orazio, M. et al. (2002). Cenozoic magmatism in the western Ross Embayment: Role of mantle plume versus plate dynamics in the development of the West Antarctic Rift System. *JGR*, 107, No. B9, pp. 1-22. <https://doi.org/10.1029/2001JB000515>
12. Shen, W., Wiens, D. A., Anandakrishnan, S. et al. (2018). The Crust and Upper Mantle Structure of Central and West Antarctica From Bayesian Inversion of Rayleigh Wave and Receiver Functions. *JGR: Solid Earth*, 123, pp. 7824-7849. <https://doi.org/10.1029/2017JB015346>
13. Vries, M. V. W., Bingham, R. G. & Hein A. S. (2017). A new volcanic province: an inventory of subglacial volcanoes in West Antarctica Geological Society, London, Special Publications, 461, pp. 231-248. <https://doi.org/10.1144/SP461.7>
14. Winberry, J. P. & Anandakrishnan, S. (2004). Crustal structure of the West Antarctic rift system and Marie Byrd Land hotspot. *Geology*, 32(11), pp. 977-980. <https://doi.org/10.1130/g20768.1>

Received 14.04.2020

В.Г. Бахмутов¹, В.Д. Соловійов¹,
М.А. Якимчук², І.М. Корчагін¹

¹ Інститут геофізики ім. С.І. Субботіна НАН України, Київ

² Інститут прикладних проблем екології, геофізики і геохімії, Київ

E-mail: solvalera@ukr.net, yakymchuk@gmail.com

ГЛИБИННІ РОЗПЛАВИ МАГМАТИЧНИХ КАНАЛІВ ВЕЛИКИХ ВУЛКАНІВ ЗАХІДНОЇ АНТАРКТИДИ: НОВІ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДАНІ

Отримано нові експериментальні дані про глибинний розподіл частотно-резонансних характеристик порід для окремих вулканів і вулканічних провінцій Західної Антарктиди і Антарктики. Результати досліджень показують існування в Західній Антарктиді складної магно-газо-флюїдної системи, що складається з ряду магматичних камер, які живляться магмами, піднятими з мантії в проміжні (корові) зони накопичення. Для вулканічних провінцій виділені глибинні границі положення коренів каналів (вулканів) різного віку — 95, 217, 470 і 723 км. Це свідчить про істотну роль багатозафазної імпульсної вулканічної діяльності (по вертикальних каналах міграції глибинних флюїдів) у формуванні тектонічної різноманітності і еволюції структур континентальних окраїн антарктичного регіону. За даними частотно-резонансних досліджень, канали з різною глибиною розплаву заповнені базальтами, кімберлітами, ультрамафітами і різними групами осадових порід. Наявність вулканічних структур з корінням на різних глибинах дозволяє припустити їх закономірний зв'язок з процесами тектонічної активізації, які відбувалися в цих регіонах за останні 500 млн років. Використання еталонних частот для різних типів відомих порід дозволяє застосовувати частотно-резонансні методи для вивчення глибинної будови нашої планети і рішення проблем пошуків багатьох видів корисних копалин.

Ключові слова: Західна Антарктида, глибинна будова, море Росса, Еребус, вулкани, прямі пошуки, мобільна технологія, обробка даних ДЗЗ.

V.G. Bakhmutov¹, V.D. Soloviev¹,
N.A. Yakymchuk², I.N. Korchagin¹

¹ S. I. Subbotin Institute of Geophysics of the NAS of Ukraine, Kyiv

² Institute of Applied Problems of Ecology, Geophysics and Geochemistry, Kyiv

E-mail: solvalera@ukr.net, yakymchuk@gmail.com

DEEP MELTS OF LARGE VOLCANOES AND VOLCANIC PROVINCES OF WEST ANTARCTICA: NEW EXPERIMENTAL DATA

New experimental data on the deep distribution of the frequency-resonance characteristics of rocks for Western Antarctica separate volcanoes and volcanic provinces have been obtained. The research results show the existence, in the West Antarctica, of a complex magma-gas-fluid system, consisting of a series of magma chambers with magmas that were raised from the mantle to intermediate (crustal) accumulation zones. The deep boundaries have been identified for volcanoes and volcanic provinces canal roots position with different ages — 95, 217, 470, and 723 km. These results indicate the significant role of the multiphase pulsed volcanic activity (along vertical channels of deep fluid migration) in the formation of the tectonic diversity and the evolution of continental margin structures in the Antarctic region. According to the frequency resonance studies data, channels with different formation depths are filled with basalts, kimberlites, ultramafic rocks, and various groups of sedimentary rocks. The presence of volcanic structures with roots at various depths suggests their regular relationship with the processes of tectonic activation in this region that have occurred over the past 500 million years. The use of reference frequencies for different types of known rocks allows one to study the deep structure of our planet and to solve the problems of search for many minerals.

Keywords: West Antarctica, deep structure, Ross Sea, Erebus, volcanoes, direct searches, mobile technology, remote sensing data processing.