

Западный и Восточный циркуляционно-вихревые комплексы своим функционированием обеспечили формирование продуктивной минерализации преимущественно золоторудного этапа, в котором выделяют две стадии: золото-сульфидную (с преобладанием пирита) и кварц-карбонат-полисульфидную (содержащую пирротин) [1]. Сведения о многочисленных минеральных ассоциациях стадий и условиях их формирования изложены в работах [1, 2].

4-4. *Динамическим критерием* оруденения в системе «электрическая поляризуемость — магнитная восприимчивость» является наличие циркуляционно-вихревых комплексов, в которых зоны циркуляции векторов приращения поляризуемости вмещают основные рудные тела. Эмпирически вырисовывается схема функционирования природной «динамо-машины», самоподдерживающейся за счет вращательной динамики взаимосвязанных полевых, теплоэнергетических и вещественных потоков достаточно длительное время, в течение которого сформировалось золотосульфидное оруденение, представляющее промышленный интерес.

ЛИТЕРАТУРА

1. Волков А.В. Месторождение Майское / Многофакторные прогнозно-поисковые модели месторождений золота и серебра Северо-Востока России / Под ред. М.М. Константинова, И.С. Розенблюма, М.З. Зиннатуллина. — М.: Недра, 1992. — С. 79–84.
2. Константинов М.М., Некрасов Е.М., Сидоров А.А., Стружков С.Ф. Золоторудные гиганты России и мира. — М.: Научный мир, 2000. — С. 28–36, 181.
3. Мезенцева А.Е. Принципы самоорганизации и динамика формирования рудообразующих систем на примере золото-серебряных месторождений Северо-Востока России / Геологическое строение, магматизм и полезные ископаемые Северо-Восточной Азии: Тез. докл. IX сессии СВО ВМО. — Магадан: СВКНИИ ДВО РАН, 1997. — С. 116–120.
4. Мезенцева А.Е. Метод фазовых траекторий для прогноза золоторудных месторождений / Самоорганизация минеральных систем. Синергетические принципы геологических исследований / Под ред. П.М. Горяинова, Г.М. Иванюка. — М.: Геос, 2001. — С. 146–158.
5. Мезенцева А.Е. Фазово-структурный метод исследования числовых моделей рудных объектов с целью локального прогнозирования // Разведка и охрана недр. — 2015. — № 1. — С. 7–14.
6. Мезенцева А.Е., Есипенко А.Г. Физические свойства окорудных метасоматитов месторождений золота и серебра Северо-Востока РФ: сравнительная характеристика, проблемы, задачи // Разведка и охрана недр. — 2014. — № 10. — С. 31–36.
7. Цопанов О.Х., Старовойтов В.Н., Сюзюмов Л.М. и др. Комплекс геофизических и геохимических методов при поисках и разведке золоторудных месторождений на Северо-Востоке СССР / Геофизические методы поисков золоторудных месторождений. — М.: ЦНИГРИ, 1981. — С. 49–58.

© Мезенцева А.Е., 2016

Мезенцева Антонина Евгеньевна // amezentseva@yandex.ru

УДК [551.241+551.242.2](269.7)

Лейченко Г.Л.^{2,1}, Гусева Ю.Б.³, Гандюхин В.В.³ (1 — ФГУП «ВНИИОкеангеология», 2 — Санкт-Петербургский государственный Университет, 3 — ФГУНПП «ПМГРЭ»)

СТРОЕНИЕ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ТЕКТОНИЧЕСКАЯ ЭВОЛЮЦИЯ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ МОРЯ УЭДДЕЛЛА И МОРЯ ЛАЗАРЕВА

Рассматриваются основные результаты морских геофизических исследований, выполненных ФГУНПП «ПМГРЭ» в течение двух полевых сезонов 2011 и 2013 гг. в окраинных

*антарктических морях Уэдделла и Лазарева, расположенных соответственно в атлантическом и индоокеанском секторах Южного океана. На основании проведенных исследований была получена новая информация о строении и истории геологического развития земной коры, выявлены основные тектонические провинции района работ, установлено положение границы континент-океан и предложены новые геодинамические модели раннего этапа распада Гондваны. **Ключевые слова:** Антарктида, Гондвана, вулканическая окраина, рифтогенез, океанический спрединг.*

Leychenkov G.L.^{1,2}, Guseva Yu.B.³, Gandyukhin V.V.³ (1 — VNIIOkeangeologiya, 2 — Saint-Petersburg State University, 3 — Polar Marine Geosurvey Expedition)

CRUSTAL STRUCTURE AND TECTONIC EVOLUTION OF THE EASTERN WEDDELL SEA AND LASAREV SEA

*This paper consider major results of marine geophysical research carried out by Polar Marine Geosurvey Expedition during two austral seasons 2011 and 2013 in the eastern Weddell Sea and in the Lasarev Sea located in the southernmost Atlantic and Indian Oceans, respectively. Conducted surveys gave new valuable information about crustal structure and tectonic provinces in this region, position of the continent-to-ocean boundary, sea-floor spreading geometry and early history of Gondwana break-up. **Key words:** Antarctica, Gondwana, volcanic margin, rifting, oceanic spreading.*

Восточная часть моря Уэдделла и море Лазарева (ВМУ-МЛ) расположены в приантарктических частях Атлантического и Индийского океанов и включают в себя вулканическую континентальную окраину, абиссальные котловины и океанические поднятия. Этот район Мирового океана образовался в результате рифтогенеза и последующего океанического раскрытия между Африкой и Антарктидой в позднем мезозое. Вулканическая континентальная окраина ВМУ-МЛ составляет около 10 % от всей остальной пассивной окраины Антарктиды, где магматизм проявлен крайне незначительно [4].

В 2011 и 2013 гг. ФГУНПП «ПМГРЭ» выполнила в ВМУ-МЛ геофизические исследования по регулярной сети с борта НИС «Академик Александр Карпинский» (рис. 1), включавшие сейсмическое профилирование МОГТ в комплексе с гидромагнитными и гравиметрическими наблюдениями общим объемом 6200 км, а также 16 сейсмических зондирований МПВ. Для производства работ МОГТ использовался сейсмический комплекс MSX-6000 фирмы «INPUT/OUTPUT Inc.», с цифровой 352-канальной приемной расстановкой длиной 4500 м и двумя линиями групповых пневмоисточников общим объемом до 47 литров. Сейсмические зондирования МПВ выполнялись с помощью радиобуев (2011 г.) и автоматических донных сейсмических станций (2013 г.).

Ранее, в течение трех полевых сезонов 1978, 1986 и 1996 гг., в ВМУ-МЛ работал Федеральный институт геонаук и природных ресурсов (BGR, Германия), собрав более 6500 км сейсмических данных [6]. Кроме морских геофизических работ здесь в 1997 и 1999 гг. Институтом полярных исследований Альфреда Вегенера (Германия) были проведены аэромагнитные съемки с расстоянием между профилями 9–10 км [7]. Они

охватили не только морскую акваторию, но и часть суши прилегающей Земли Королевы Мод. Небольшой объем (около 1700 км) сейсмического профилирования в указанном районе выполнен в 1981 г. экспедицией Японии и Советскими (Российскими) экспедициями 1989 и 1999 гг. [8, 9] (рис. 1).

В 1987 г. на подводном поднятии Мод по программе глубоководного бурения было пробурено 2 скважины. Одна из них (скв. 690), расположенная в пределах района работ, вскрыла около 300 м пелагических биогенных осадков от позднего мела (маастрихт?) до плейстоцена, залегающих на океанических базальтах предположительно маастрихтского-кампанского возраста [1]. Отличительной особенностью ВМУ-МЛ является развитие мощных вулканических отложений на континентальной окраине, которые протягиваются вдоль побережья (шельфа и континентального склона) более чем на 1000 км (в зарубежной литературе они объединяются в толщу, называемую «Комплекс «Эксплора» [5, 6]). Окраины с подобным строением широко развиты в Атлантическом и Индийском океанах [3] и везде формировались на этапе рифтогенеза, предшествующего расколу суперконтинентов. Океаническая область рассматриваемой акватории характеризуется обилием экструзивных построек, наиболее крупные из которых — хребт Астрид и поднятие Мод в море Лазарева и плато Эксплора в море Уэдделла. Детальные аэромагнитные исследования, выполненные институтом Альфреда Вегенера, позволили идентифицировать серию магнитных аномалий от М19 до С34 в восточной части

моря Уэдделла [7], но на большей части моря Лазарева строение океанической коры и положение ее границы с рифтогенной корой континентальной окраины оставались неясными. Новые данные, полученные российскими специалистами, позволили существенно развить представления о строении земной коры и истории тектонического развития этого региона Антарктики.

Строение земной коры

На строение земной коры ВМУ-МЛ существенное влияние оказал магматизм и сложная геодинамика ранней фазы океанического раскрытия. Вулканическая толща, развитая в пределах континентальной окраины, отличается динамически контрастной сейсмической границей в кровле (она рассматривается в качестве акустического фундамента) и наличием протяженных (до 50 км) погружающихся и расходящихся в сторону океана внутренних отражений (рис. 2), которые являются типовым признаком излившихся в субэкральных или мелководно-морских условиях лавовых потоков. На большей площади своего развития она характеризуется интенсивными магнитными аномалиями амплитудой до 400 нТл (рис. 3) [8]. Ее мощность по данным сейсмических исследований и результатам моделирования потенциальных полей изменяется от 2 до 5 км. Местами вулканическая толща ограничивается со стороны океана линейными или изометричными поднятиями акустического фундамента (рис. 4). Внешняя (северная) сторона поднятий образует крутой уступ высотой до 1,0–1,5 км, часто проявленный в морфологии морского дна (рис. 2). Моделирование потенциальных полей

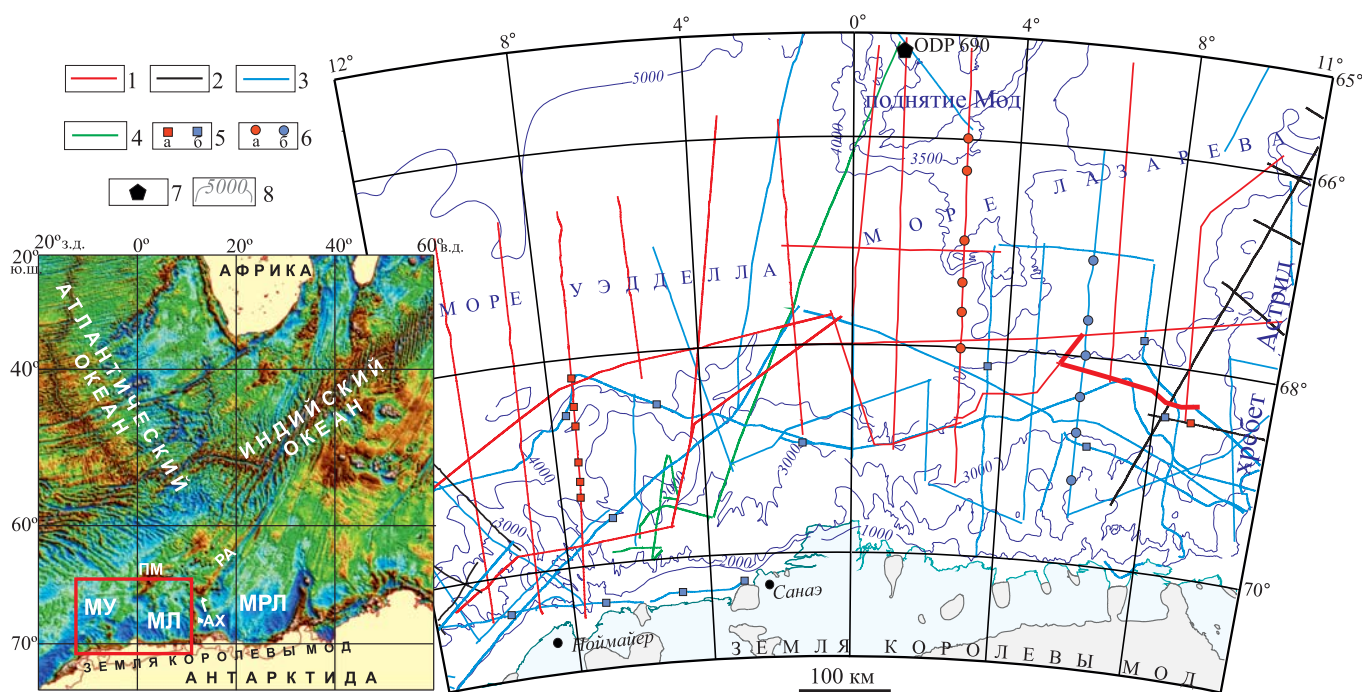


Рис. 1. Схема сейсмических профилей (МОБ ОГТ) района исследований (жирной линией показано положение разреза на рис. 2). 1 — профили ФГУНПП «ПМГРЭ», выполненные в 2011 и 2013 гг.; 2–4 — профили предшествующих исследований, выполненные экспедициями: России (2); Германии (3); Японии (4); 5–6 — зондирования МПВ, выполненные с использованием: 5 — радиобуев (а — Россия, б — Германия); 6 — донных станций (а — Россия, б — Германия); 7 — скважина глубоководного бурения (1987 г.); 8 — изобаты (в метрах). На врезке: район исследований (красный прямоугольник) на карте Индийского океана (показано аномальное гравитационное поле в редукции Фая, вычисленное по данным спутниковой альтиметрии [11]). Буквами обозначены: МУ — море Уэдделла; МЛ — море Лазарева; МРЛ — море Рисер-Ларсена; ПМ — поднятие Мод; АХ — хребт Астрид; РА — разломная зона Астрид

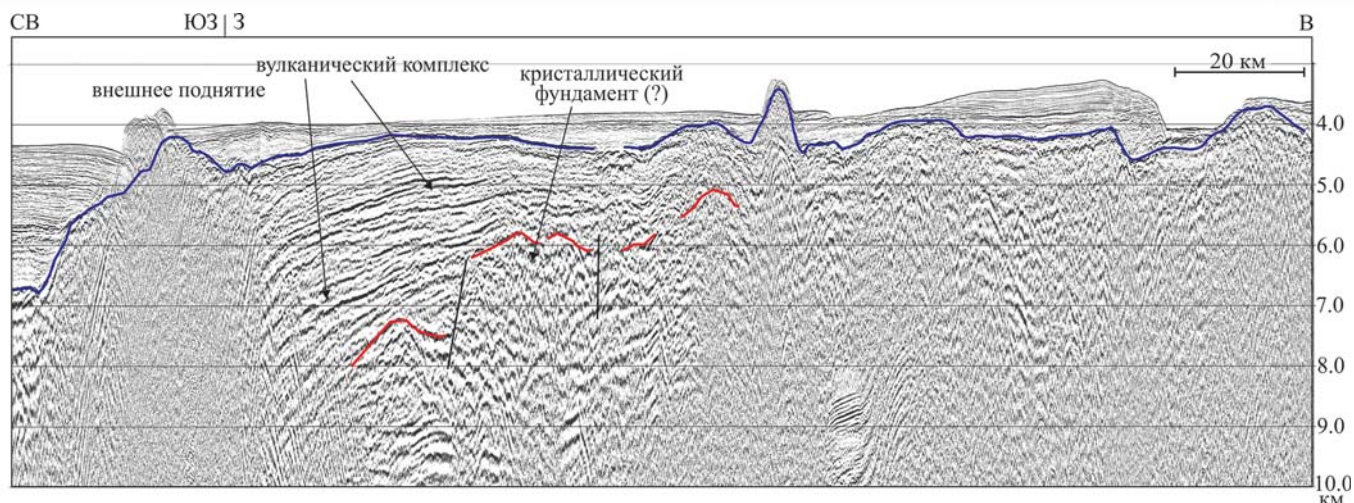


Рис. 2. Глубинный сейсмический разрез через вулканическую континентальную окраину моря Лазарева

указывает на повышенные значения плотности и намагниченности поднятий по сравнению с расслоенной вулканической толщей. Возможно, что, как и на некоторых других вулканических окраинах, их образование связано с изменением режима экструживной деятельности на поздней стадии рифтогенеза, когда в условиях погружения земной коры и развития морских бассейнов возникают цепочки вулканов взрывного типа [10]. Океаническая кора ВМУ-МЛ преимущественно идентифицируется по особенностям строения фундамента, наличию линейных магнитных аномалий и протяженных разломов, представляющих собой бывшие трансформные границы плит. В море Уэдделла самая древняя магнитная аномалия соответствует хрону М19 (около 145 млн. лет) и фактически примыкает к линейному поднятию, ограничивающему вулканический комплекс (рис. 4) [7].

В океанической коре моря Лазарева по результатам выполненных исследований на основании анализа данных спутниковой альтиметрии (рис. 1, врезка) и магнитных данных 58 РАЭ, интегрированных с материалами аэросъемок немецких экспедиций, впервые выявлена система палеотрансформных разломов СВ-ЮЗ простирания. Они прослеживаются из глубоководной котловины Индийского океана и иногда маркируются локальными поднятиями поверхности Мохоровичича, которые видны на разрезах по данным МОГТ (рис. 4). Несмотря на относительно плотную сеть магнитных наблюдений, близко расположенные разломы су-

щественно затрудняют идентификацию спрединговых магнитных аномалий, тем не менее, в одной из узких межтрансформных зон ненарушенной океанической коры нами моделируется последовательность аномалий от М16 до М0 и скорость полуспрединга — 12–14 мм в год (рис. 3, 4). Время раскола литосферы в море Лазарева по аналогии с морем Рисер-Ларсена [9] предположительно составляет около 160 млн. лет, т.е. большая часть океанической коры имеет здесь позднюрский-раннемеловой возраст. Отличительной особенностью океанического фундамента в рассматриваемом районе является его преимущественно ровная поверхность (под которой на отдельных участках наблюдаются наклонные границы), характерная для океанических

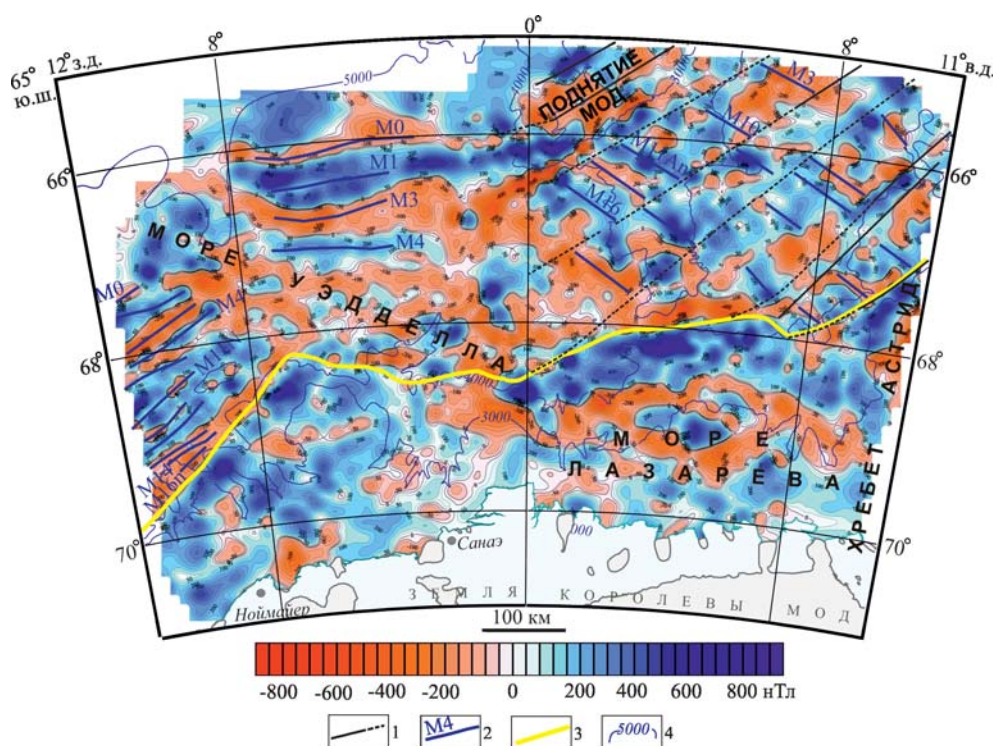


Рис. 3. Аномальное магнитное поле района исследований: 1 — палеотрансформные разломы; 2 — линейные магнитные аномалии с номерами хронов полярности; 3 — граница континент-океан; 4 — изобаты (в метрах). В море Уэдделла магнитные аномалии даны по [7]; в море Рисер-Ларсена по [9]

областей, примыкающих к континентальным окраинам вулканического типа. Во внутренней структуре фундамента поднятия Мод и на его периферии установлены наклонные отражения, прослеживающиеся до глубин 2,0–3,5 км от поверхности. Фундамент опробован скважиной глубоководного бурения и представлен типичными для океанических островов и плато толстыми базальтами предположительно позднемелового возраста. В море Лазарева выделены зоны с повышенной (до 13,5 км) мощностью земной коры. Они обрамляют подводные поднятия Мод и Астрид и достигают ширины 50–100 км.

Одной из главных задач исследований являлось определение границы между корой континентального и океанического типов. На основании интерпретации всех имеющихся данных установлено, что эта граница располагается в подножии линейных поднятий фундамента, ограничивающих со стороны океана распространение вулканической толщи. В остальной части окраины ее положение достаточно надежно устанавливается по изменению характера магнитного поля и структуры акустического фундамента (кровли вулканических толщ окраины и 2-го океанического слоя). На большей части изученной акватории простирается граница континент-океан в целом соответствует направлению (и лежит на продолжении) палеотрансформных разломов, имеющих СВ-ЮЗ простираение. Это означает, что в ВМУ-МЛ она может иметь сдвиговую природу (рис. 4). Если это так, то образование поднятий, марки-

рующих границу континент-океан, возможно было связано не только (или не столько) с экструзивным вулканизмом, как указано выше, но и с различными процессами, которые характерны для трансформных окраин: сжатием, возникшим на начальной стадии движения африканской и антарктической плит или дифференцированным опусканием блоков земной коры (т.е. с более быстрым опусканием блоков по обе стороны от поднятия).

История тектонического развития

После объединения в единый материк в раннем кембрии большая часть Гондваны сохраняла стабильное состояние до позднего карбона, когда в ее литосфере возникли растягивающие напряжения, которые привели к рифтогенезу и последующему распаду. Ранняя фаза рифтогенеза маркируется проявлением основного (интрузивного и эффузивного) магматизма в интервале времени 200–170 млн. лет (с пиком его интенсивности около 180 млн. лет назад) на сопряженных территориях центральной Гондваны — в юго-западной Африке и Восточной Антарктике [2].

Пространственное распространение и геохимические особенности магматических пород позволили сделать вывод, что их происхождение связано с внедрением мантийного плюма Кару, который привел к разогреву верхней мантии Восточной Гондваны и создал дополнительный режим растяжения в литосфере за счет ее сводового вздымания [8]. В период рифтогенеза между Африкой и Антарктидой образовалась обширная вулканическая

окраина, протягивающаяся от восточной части моря Уэдделла до моря Рисер-Ларсена.

После раскола Гондваны и раскрытия океанического бассейна (от ~160 до ~135 млн. лет) Африка вместе с Южной Америкой и Фолклендским плато двигалась на север относительно Антарктиды с развитием сложного сочетания спрединговых центров и трансформных разломов в морях Рисер-Ларсена, Лазарева и Уэдделла (рис. 4, левая врезка). Положение трансформных разломов в западной части Индийского океана и юго-восточной части Атлантического океана, хорошо проявленных в альтиметрических данных (рис. 1, врезка), указывает, что Мозамбикский хребт непосредственно примыкал к континентальной окраине Восточной Антарктиды в море Лазарева. Точный возраст Мозамбикского хребта остается неизвестным, но северная его часть, вероят-

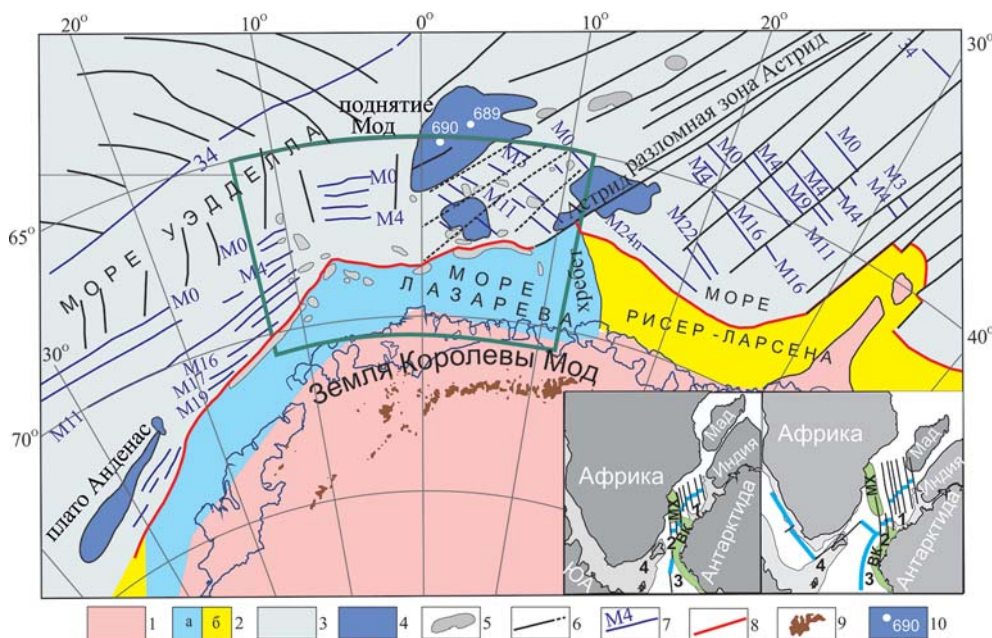


Рис. 4. Схема тектонического строения: 1 — Антарктический кристаллический щит; 2 — рифтовая континентальная окраина: а — вулканическая, б — невулканическая; 3 — океаническая плита; 4 — океанические вулканические поднятия; 5 — локальные поднятия фундамента (изометричные поднятия — вулканические постройки; линейные поднятия окраины — вулканические цепи или присдвиговые структуры); 6 — палеотрансформные разломы; 7 — линейные магнитные аномалии с номерами хронов полярности; 8 — граница континент-океан; 9 — выходы коренных пород на суше; 10 — скважины глубоководного бурения. Синим контуром обозначен район исследований. На врезке: реконструкция Гондваны на время ~140 млн. лет (левая) и 130 млн. лет (правая). Синие линии — оси спрединговых хребтов; черные — трансформные разломы. Цифрами обозначены: 1 — море Рисер-Ларсена, 2 — море Лазарева, 3 — море Уэдделла, 4 — Фолклендское плато. ЮА — Южная Америка, МХ — Мозамбикский хребт, ВК — вулканический комплекс

но, сформировалась в ранний период океанического раскрытия (в конце средней — начале поздней юры) и наращивалась на юг в ходе дивергенции африканской и антарктической плит до середины нижнего мела.

Расхождение Восточной и Западной Гондваны (Южная Америка-Африка) и Восточной (Антарктида-о. Мадагаскар, Индия-Австралия-Новая Зеландия) происходило до раннемелового времени (около 135–130 млн. лет назад), когда в результате реорганизации движения литосферных плит в Южном океане возникло тройное сочленение, связанное с раскрытием южной Атлантики и образованием Антарктической, Африканской и Южно-американской плит (рис. 4, правая врезка).

Формирование океанической коры в условиях продолжавшегося апвеллинга горячей мантии (действия плюма Кару) сопровождалось более активным вулканизмом в пределах СОХ и внутриплитным магматизмом, следствием которого явилось образование океанических поднятий: плато Анденес и банки Поларштерн в море Уэдделла, поднятия Мод в море Лазарева, северной части хребта Астрид в море Рисер-Ларсена, а также Мозамбикского хребта и плато Агульяс вблизи юго-восточной Африки. Поднятие Мод, имеющее преимущественную СВ-ЮЗ ориентировку образовалось так же, как и северная часть хребта Астрид [9] при растяжении океанической коры в трансформном разломе (транстензионный режим) под влиянием продолжавшего действовать мантийного плюма Кару.

ЛИТЕРАТУРА

1. Barker P., Kennett J. Proceedings of the Ocean Drilling Program Initial Reports. 113. Ocean Drilling Program. — College Station, Texas, 1988. — 774 P.
2. Duncan R.A., Hooper P.R., Rehacek J., etc. The Timing and Duration of the Karoo Igneous Event, Southern Gondwana // Journal of Geophysical Research, 1997. — Vol. 102. — PP. 18127–18138.
3. Geoffroy L. Volcanic passive margins. C.R. // Geoscience, 2005. — Vol. 337. — PP. 1395–1408.
4. Griukurov G., Leytchenkov G.L. Tectonic Map of Antarctica. Commission for Geological Map of the World, Paris, 2012.
5. Hinz K., Krause W. The continental margin of Queen Maud Land / Antarctica: Seismic sequences, structural elements and geological development. Geologisches Jahrbuch E23, 1982. — PP. 17–41.
6. Hinz K., Neben S., Guseva Yu.B., Kudryavtsev G.A. A compilation of geophysical data from the Lazarev Sea and the Riser-Larsen Sea, Antarctica, 2005 // Marine Geophysical Research 25, PP. 233–245.
7. Jokat W., Boebel T., König M., Meyer U. Timing and geometry of early Gondwana breakup // Journal of Geophysical Research, 2003. — Vol. 108 (B9). — doi: 10.1029/2002JB001802.
8. Leytchenkov G.L., Miller H., Zatzepin E. Structure and Mesozoic evolution of the Eastern Weddell Sea, Antarctica: History of early Gondwana Break-up. Weddell Sea Tectonics and Gondwana break-up. 1996. In: Storey B.C., King E.C., Livermore R.A. (eds.). / Geological Society, Special Publication, London. — Vol. 108. — PP. 175–190.
9. Leytchenkov G., Guseva J., Gandyukhin V., etc. Crustal structure and tectonic provinces of the Riiser-Larsen Sea area (East Antarctica): results of geophysical studies. // Marine Geophysical Research, 2008. — Vol. 29. — PP. 135–158.
10. Planke S., Symonds P., Alvstad E., Skogseid J. Seismic volcanostratigraphy of large basaltic extrusive complexes on rifted margins. // Journal of Geophysical Research, 2000. — Vol. 105. — PP. 19355–19351.
11. Sandwell D.T. & Smith W. H. F. Global marine gravity from retracked Geosat and ERS-1 altimetry: Ridge segmentation versus spreading rate. // Journal of Geophysical Research, 2009. — Vol. 114. — B01411, doi:10.1029/2008JB006008.

© Лейченков Г.Л., Гусева Ю.Б., Гандюхин В.В., 2016

Лейченков Герман Леонидович // german_l@mail.ru

Гусева Юлия Борисовна // antarctica@polarex.spb.ru

Гандюхин Виктор Всеволодович // antarctica@polarex.spb.ru

Великин А.Б., Великин А.А. (ФГУНПП «Геологоразведка»)

НОВЫЙ КОРРЕЛЯЦИОННЫЙ МЕТОД ИМПУЛЬСНОЙ ЭЛЕКТРОРАЗВЕДКИ С ШУМОПОДОБНЫМИ СИГНАЛАМИ СТЕМ

*Представлены новый корреляционный метод импульсной электроразведки со специальными шумоподобными сигналами (ШПС), а также экспериментальный образец программно-аппаратурного комплекса СТЕМ-1 с повышенной глубиной и разрешающей способностью для поисков углеводородного сырья, опробованные в полевых условиях в Калужской области, Красноярском крае и Иркутской области в 2012–2014 гг. Рассмотрены результаты физического и математического моделирования. Сформулированы основные геологические результаты, полученные при опробовании комплекса СТЕМ-1 в Иркутской области. **Ключевые слова:** импульсная электроразведка, шумоподобные сигналы, псевдослучайная бинарная последовательность (ПСБП).*

Velikin A.B., Velikin A.A. (Geologorazvedka)

A NEW CORRELATION TRANSIENT ELECTROMAGNETIC METHOD WITH NOISE-TYPE SIGNALS CTEM

*A new correlation transient electromagnetic method with special noise-like signals and a prototype system CTEM-1 for more resolution and depth penetration in oil and gas prospecting are presented after field testing in Kaluga, Krasnoyarsk and Irkutsk regions. The physical and mathematical modeling results are reviewed and the main geological results of the testing in Irkutsk region are indicated. **Key words:** transient electromagnetic, noise-type signals, pseudo random binary sequence (PRBS).*

За последние десятилетия индукционная импульсная электроразведка прочно вошла в комплекс региональных исследований при поисках нефти и газа для изучения геоэлектрического строения осадочного чехла, выделения зон коллекторов с высокоминерализованными водами, а также поиска и картирования водонефтяного контакта в зонах развития проводящих коллекторов. Кроме того, она давно и успешно применяется для поисков рудных месторождений, а также подземных вод [9].

Основной проблемой метода является его низкая устойчивость к широкополосному шуму, которая ограничивает глубину исследований. Современные технологии измерения ЭМ полей позволяют существенно подавлять помехи, сосредоточенные в узких промежутках времени (импульсные помехи) или в узкой полосе частот (промышленные помехи на частоте 50 Гц и ее гармоники). Широкополосный или «белый» шум можно уменьшить только путем накопления сигнала или увеличения мощности источника ЭМ поля, что связано с многократными затратами времени и энергии.

Низкая помехоустойчивость импульсной электроразведки является следствием присущего ей технического противоречия между точностью измерения сигнала и шириной полосы частот пропускания. Действительно, процесс измерения переходной характеристики электрического разреза заключается в определении