

УДК 552.2 (263)

## НОВЫЕ ДАННЫЕ О СУЛЬФИДНЫХ РУДОПРОЯВЛЕНИЯХ В РИФТОВОЙ ВПАДИНЕ МАРКОВА НА СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКОМ ХРЕБТЕ В ЭКВАТОРИАЛЬНОЙ АТЛАНТИКЕ (6° С.Ш.)

© 2004 г. В. Е. Бельтнев, В. Н. Иванов, С. Г. Сколотнев, А. В. Нещеретов,  
И. И. Рождественская, В. В. Шилов, Т. В. Степанова, И. А. Андреева, М. П. Давыдов,  
А. А. Пейве, Е. В. Шарков, Д. И. Кринов, С. С. Абрамов, А. Г. Мочалов

Представлено академиком Ю.М. Пушаровским 30.10.2003 г.

Поступило 12.11.2003 г.

Известные на сегодняшний день гидротермальные проявления на океанском дне, с которыми связаны так называемые черные курильщики, являющиеся мощными коллекторами сульфидно-колчеданных полиметаллических руд, распространены вдоль Срединно-Атлантического хребта (САХ) крайне неравномерно, в связи с чем остро стоит проблема выработки критериев их поиска и познания их природы.

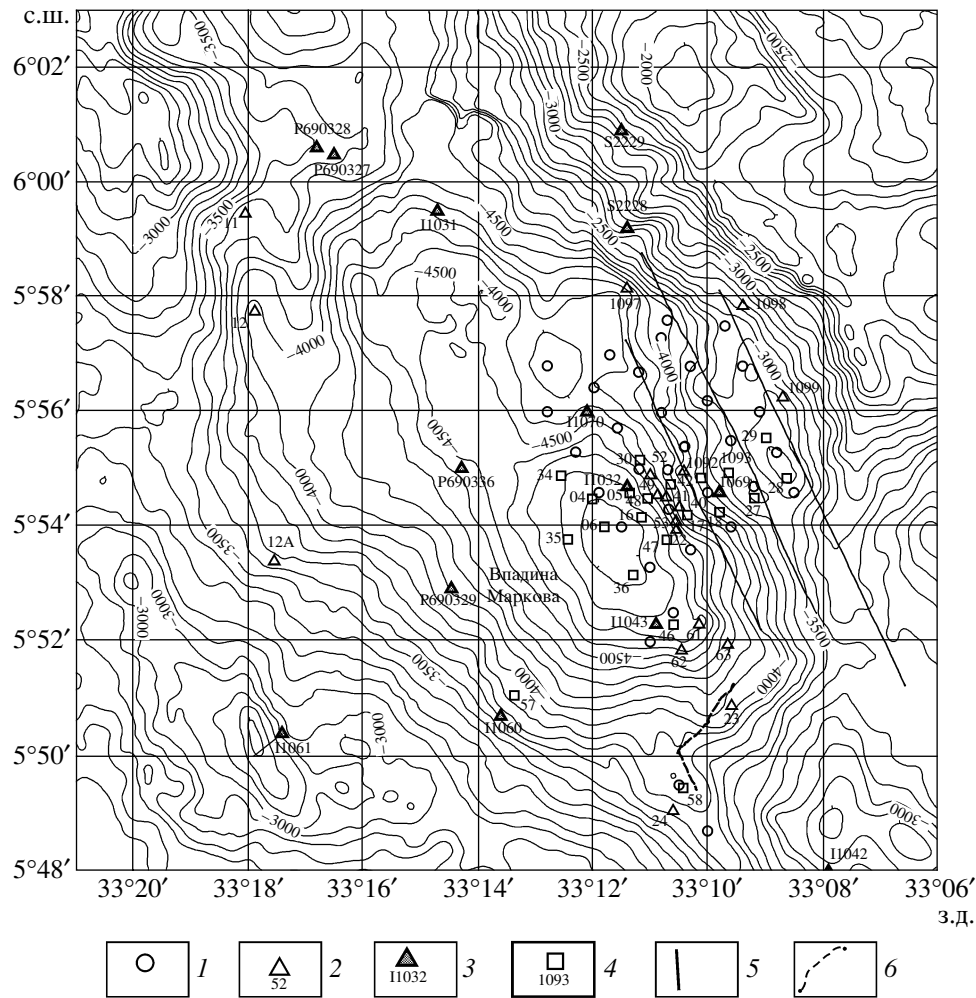
В 10-м рейсе нис “Академик Иоффе” в районе разлома Сьерра-Леоне в осевой части САХ (6° с.ш.) были подняты фрагменты массивной сульфидной руды [1]. Они были драгированы с восточного борта глубоководной (до 5000 м) рифтовой впадины Маркова (станция П1032). Полученные образцы руды по своим особенностям резко отличаются от таковой, слагающей тела “черных курильщиков”. Они представляют собой относительно крупнозернистые халькопиритовые образования в ассоциации с пренит-хлорит-клиноцоизитовыми метасоматитами, развитыми по апогаббровым милонитам и катаклазитам [1]. Данные по составу железо-марганцевых образований [2], термохалинной структуре морской воды [3], прозрачности морской воды [4] косвенно указывают на то, что в районе восточного борта впадины Маркова действовали и действуют гидротермальные системы, разгружающиеся на морском дне. Анализ

геологического строения впадины Маркова также дает основания считать весь участок дна в районе впадины Маркова потенциально рудоносным [4]. Этот вывод базируется на том, что на этом участке дна сочетаются интенсивные тектонические движения, обуславливающие хорошую проницаемость коры, и магматические процессы, преимущественно протекающие в относительно долгоживущих магматических камерах небольших размеров, являющихся как источником тепла для гидротермальных растворов, так и, вероятно, в определенной мере источником рудных компонентов.

Совокупность этих результатов, полученных в 10-м рейсе нис “Академик Иоффе” сотрудниками ГИН РАН и ИГЕМ РАН, послужила основанием для проведения в районе впадины Маркова геолого-гидрофизических работ во время 22-го рейса нис “Профессор Логачев” (апрель–май 2003 г.), организованного на средства МПР РФ. Основная цель этих работ – оценить перспективность рудоносности впадины Маркова.

В ходе этих работ были выполнены площадные гидрофизические и гидрохимические исследования (площадь около 42 км<sup>2</sup>) от днища впадины Маркова до террасы на ее восточном борту (на уровне 3500–3600 м) со средним расстоянием между станциями около 1.5 км и 4 станции в южной части полигона с помощью гидрофизического зонда “SBE 911 plus” и пробоотборника “SBE 32 Carousel” (всего 35 станций) с отбором проб на 6–12 горизонтах (рис. 1). Пробоподготовка морской воды для анализа методом атомной адсорбции на борту судна проводилась по оригинальной методике, разработанной во ВНИИОкеангеологии. В районе ст. П1032, на которой были подняты фрагменты массивной руды, проводилось детальное опробование донных осадков с помощью коробчатого пробоотборника (максимальная мощность отбираемой колонны донных осадков до 1.7 м) (19 станций) со средним расстоянием между станциями около

*ФГУНПП “Полярная морская геологоразведочная экспедиция”,  
Санкт-Петербург, г. Ломоносов Ленинградской обл.  
Геологический институт  
Российской Академии наук, Москва  
Всероссийский научно-исследовательский институт  
геологии и минеральных ресурсов,  
Санкт-Петербург  
Институт геологии рудных месторождений,  
минералогии, петрографии и геохимии  
Российской Академии наук, Москва*



**Рис. 1.** Карта фактического материала работ в районе впадины Маркова. Батиметрические данные из работы [6]. Станции опробования и их номера: 1 – гидрофизический зонд; драги: 2 – 22-й рейс нис “Профессор Логачев”, 3 – 22-й рейс нис “Академик Николай Страхов”, 10-й рейс нис “Академик Иоффе”, нис “Пилсберри” (США); 4 – корабчатый пробоотборник; профили: 5 – сонара бокового обзора (ГБО МАК-1М), 6 – телевизионного аппарата. Перед двузначными номерами станций опущены цифры 11 (например, 04 читай 1104).

1 км и драгирование (17 станций). С помощью гидролокатора бокового обзора “МАК-1М”, буксируемого в 50 м над дном, были получены сонограммы средней части восточного склона впадины Маркова для площади около 200 км<sup>2</sup>. Выполнен также один профиль телепрофилирования длиной 10 км.

Проведенные гидрофизические исследования не обнаружили каких-либо значимых аномалий в вертикальном и латеральном распределении потенциальной температуры, солености и плотности морской воды в слое 3000 м – дно в обследованном районе. Температура и соленость в целом устойчиво понижаются с глубиной. На максимальной глубине зондирования (4941 м) потенциальная температура равна 2.277°C, соленость – 34.892 рсу. Мутность глубинных и придонных вод изменялась в пределах от 0.006 до 0.012 FTU, что соответствует чистым океанским водам.

Усредненные концентрации растворенных форм марганца, железа, меди и цинка в водах над впадиной Маркова очень малы и сопоставимы с таковыми для других осевых районов САХ, например для сегмента 24°30′ – 13° с.ш., измеренными по той же методике. Тем не менее примерно на половине станций опробования один или даже несколько придонных горизонтов воды имеют повышенные, высокие или даже аномально высокие концентрации либо одного из микроэлементов, либо всего марганца, либо двух: железа и марганца, меди и цинка, либо отмечается комплексная аномалия всех четырех микроэлементов. Станции с аномалиями располагаются выше по склону ближе к кромке террасы (ст. 1131, 1151, 1137), над кромкой террасы (ст. 1132, 1138), над террасой (ст. 1145, 1133, 1121, 1115), при этом в последнем случае на станциях 1133 и 1121 обнару-

жены одни из наиболее высоких концентраций меди и цинка. Все зоны, маркируемые этими станциями, вытягиваются в северо-западном направлении подобно элементам рельефа на этом участке. Второй куст аномальных станций, простирающийся в целом в северо-восточном направлении, располагается вдоль северного борта впадины Маркова на южной границе небольшого поднятия, ограничивающего ее с севера (ст. 1095, 1154, 1113, 1150, 1155). Наконец, на ст. 1159 над узкой клиновидной рифтовой долиной, надстраивающей к юго-востоку впадину Маркова, существует комплексная аномалия всех измеренных микроэлементов.

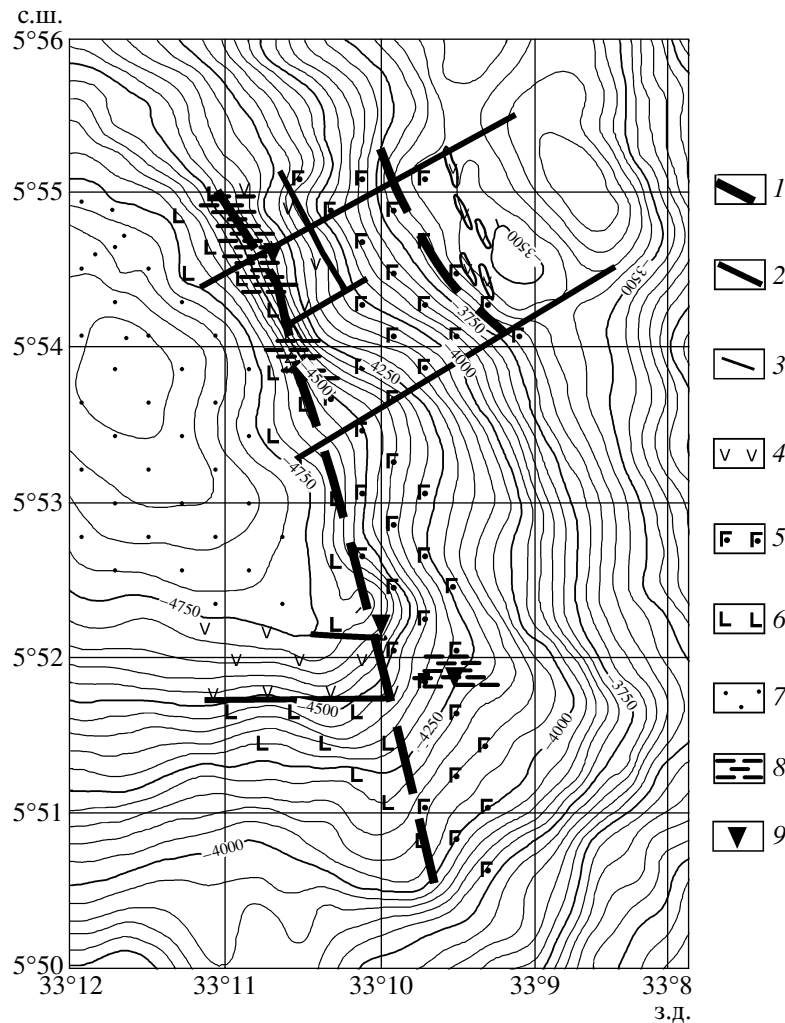
Осадки занимают около 60% площади в изучаемом районе (по данным геологического опробования, телепрофилирования и "МАК-1М"). Отложения распределены неравномерно по площади: они развиты в центральной части впадины Маркова и на выровненных участках тектонических ступеней. Осадки относятся к карбонатным, терригенным и смешанным типам. Карбонатные отложения представлены биогенными кокколитофораминиферовыми илами и фораминиферовыми песками. Карбонатность донных осадков, измеренная кальциметром, меняется в зависимости от глубины. Сильнокарбонатные осадки ( $\text{CaCO}_3 > 75\%$ ) расположены выше 4200 м, карбонатные ( $\text{CaCO}_3$  50–75%) от 4200 до 4700 м, слабокарбонатные ( $\text{CaCO}_3$  10–50%) отложения на глубинах, превышающих 4700 м. Терригенный тип донных осадков связан с деятельностью мутьевых потоков (турбидитов), которые фиксируются во всех литостратиграфических слоях геологического разреза. Обломочный материал этих осадков представлен продуктами разрушения коренных пород – перидотитов, габброидов, базальтов (эдафогенный материал). Обычно отложения мутьевых потоков представлены дресвяно-песчаными смесями и песками. В отдельных разрезах отмечаются признаки градационной слоистости – ст. 1104.

В изученном осадочном разрезе впадины Маркова выделяются сверху вниз три основных литостратиграфических слоя. Первый слой (мощность 2–3 см) представлен полужидкими, текучими илами или песком карбонатного типа серовато-бежевого цвета. Второй слой (максимально мощность слоя 78 см (ст. 1116)) представлен пластичными, влажными, пятнистыми карбонатными илами бежевого цвета с примесью фораминиферовых, фораминиферово-эдафогенных песков и дресвяно-песчаных смесей (турбидитов). Третий слой (максимальная мощность 84 см (ст. 1157)) представлен слабопятнистыми, пятнисто-полосчатыми, пластичными, влажными илами и песками карбонатного типа бежевого цвета, присутствует примесь эдафогенного материала. Возраст осадков, установленный по планктонным фораминиферам, позволяет отнести осадки первого и второго слоев к голоцену 0–11 тыс. лет (зона Z) [5], третьего слоя – к позднему

плейстоцену 11–75 тыс. лет (зона Y), [5]. Максимальная скорость осадконакопления 8–9 см/тыс. лет.

Проведенное изучение минералов из тяжелой фракции осадков показало отсутствие аномальных содержаний минералов-индикаторов гидротермальной деятельности как в поверхностном слое, так и по разрезу на станциях, расположенных в непосредственной близости от ст. 11032 и выше на террасе восточного борта (ст. 1091, 1092, 1093, 1116, 1127, 1128, 1129, 1147, 1148). Общее содержание сульфидов варьирует на них в пределах 2–14 знаков (максимально до 26), оксигидроксидов железа – 260–750 знаков (максимально 1500). Такие же низкие содержания этих минералов обнаружены на станциях, приуроченных к юго-восточному (ст. 1123) и юго-западному (ст. 1157) бортам впадины Маркова. Станции с аномальными концентрациями минералов-индикаторов расположены в самой глубокой части впадины ближе к ее северному окончанию (ст. 1106), в юго-восточном углу впадины (ст. 1146) и на борту рифтовой долины, продолжающей к юго-востоку впадину Маркова (ст. 1124 и 1158). На ст. 1106 общее число сульфидов, среди которых резко преобладает пирит, составляет 510 знаков, а оксигидроксидов железа 9700 знаков. Заметно повышенное содержание минералов-индикаторов в ближайшей к ней с севера ст. 1104 (соответственно 145 и 3500 знаков). Повышенные содержания этих минералов на станциях, находящихся непосредственно к северо-западу (ст. 1134) и к северо-востоку (ст. 1105) (соответственно 43–49 и 1700–2070). К западу (ст. 1135) и к югу (ст. 1136) содержания этих минералов очень низкие. Ст. 1136, приуроченная к днищу впадины Маркова, разделяет две ст. 1106 и 1146 с аномальным содержанием минералов-индикаторов. На ст. 1146 подсчитанное общее количество сульфидов составляет 443 знака и оксигидрооксидов – 15500 знаков. На ст. 1158 среди сульфидов, общее количество которых составляет 84–120 знаков на разных горизонтах, резко доминирует пирротин, количество оксигидрооксидов 4250–8850 знаков.

Как показало драгирование, западный и восточный борта впадины Маркова сложены одинаковыми наборами пород, среди которых преобладают габброиды, в меньшем объеме встречены ультрабазиты и незначительно базальты. Среди магматических пород обнаружены плагиограниты и диориты (ст. 11060, 11063, 11068, 1122, 1153, 1161). Плагиограниты цементируют угловатые обломки мелкозернистых габбро в автомагматических брекчиях, образуют жилы мощностью 0.5–1.5 м в более крупнозернистых разновидностях габбро и встречены в виде отдельных образцов. Среди габброидов выделяются троктолиты, оливиновые и безоливиновые разновидности габбро и габбро-норитов, рудное габбро (с ильменитом). На обоих бортах впадины Маркова широко распро-



**Рис. 2.** Схема геологического строения восточного склона впадины Маркова. Батиметрические данные из работы [6]. 1 – зоны тектонических деформаций и метасоматоза; 2 – тектонические нарушения; 3 – геологические границы; 4–7 – поля преимущественного распространения: 4 – базальтов, 5 – габброидов, 6 – ультрабазитов, 7 – осадочного чехла; 8 – зоны гидротермально измененных пород; 9 – сульфидная минерализация в коренных породах.

странены милониты и катаклазиты, развитые по габброидам. На восточном борту некоторые апогаббровые милониты и катаклазиты полностью замещены клиноцоизит-пренит-хлоритовым метасоматитами. Именно с этими метасоматитами связано массивное халькопиритовое и прожилково-вкрапленное пирит-халькопирит-сфалеритовое оруденение (ст. 1141, 1149, 1122, 1161). На ст. 1163 тонкие выделения сульфидов и их агрегаты ассоциируют с ильменитом в рудных габбро.

Стенки рифта, продолжающего к юго-востоку впадину Маркова, сложены преимущественно ультрабазитами (ст. 1124). Эти ультрабазиты сильно серпентинизированы, а также пронизаны жилами арагонита.

Детальное опробование восточного и юго-восточного обрамления впадины Маркова позволило построить геологическую схему этого участка

(рис. 2). На схеме показаны поля преимущественного распространения габброидов, ультрабазитов и базальтов. По результатам драгирования удалось локализовать по крайней мере две зоны интенсивных тектонических деформаций и метасоматоза (на уровнях 4400–4600 и 3700 м), простирающихся в северо-западном направлении вдоль борта, с нижней из которых связано сульфидное оруденение на всем ее простирании. Наиболее полно рудопроявления представлены в материале ст. 1141 (массивная и прожилково-вкрапленная сульфидная минерализация), которая пересекла линию профиля драгирования ст. 11032. На ст. 1149 сульфиды образуют тонкую вкрапленность по всему объему клиноцоизит-пренит-хлоритовых метасоматитов, а на ст. 1122 – тонкие пленочные прожилки в метасоматитах. На ст. 1161 и 1163 пирротин-троилитовые минералы образуют тонкие прожилки среди габбро.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате драгирования было подтверждено наличие прожилково-вкрапленного и гнездового сульфидного пирит-халькопирит-сфалеритового оруденения, преимущественно связанного с метасоматитами, сформировавшимися по апогабровым милонитам и катаклазитами, в нижней части восточного борта впадины Маркова. Полученные новые данные позволяют более надежно локализовать встреченные рудопроявления: они тяготеют к нижней зоне тектонических деформаций и метасоматоза, протягивающейся вдоль нижней части восточного борта впадины Маркова (на уровне 4400–4600 м) в северо-западном направлении от ст. 1152 до ст. 1123.

Результаты гидрофизических исследований при данной плотности сети наблюдений с высокой степенью достоверности свидетельствуют, что высокотемпературная гидротермальная деятельность, приводящая к формированию плюмов и залежей массивных руд типа “черных курильщиков”, на восточном борту впадины Маркова в настоящее время отсутствует. Этот вывод подтверждается данными минералогического анализа тяжелой фракции верхнего слоя осадков, отобранных с восточного борта впадины Маркова. Гидрохимические аномалии воды над восточным бортом впадины Маркова, по всей видимости, связаны с низкотемпературной гидротермальной деятельностью, которая контролируется зонами интенсивных тектонических деформаций и гидротермального метасоматоза, что подтверждается находками слоистых железо-марганцевых корок гидротермального происхождения на ст. 1149.

Таким образом, обнаружен новый тип сульфидного полиметаллического рудопроявления на океанском дне. Эти рудопроявления имеют метасоматическое происхождение. Некоторые факты, в частности ассоциация сульфидов с ильменитом в рудных габбро на ст. 1163, указывают на то, что природа рудоносного флюида, возможно, является магматогенной. Проведенные работы не позволяют оценить масштаб этих рудопоявлений. Основные отложения руды могут находиться ниже уровня дна и их запасы могут достигать больших величин, поскольку в отличие от “черных курильщиков” при образовании данных руд не происходило рассеивания рудного вещества.

В ходе работ также было выявлено два района с аномально высокими концентрациями минералов-индикаторов гидротермального генезиса. Первый и наиболее перспективный из них расположен в южной части полигона в районе рифтовой долины, надстраивающейся к юго-востоку впадину Маркова, где в осадках в значительных количествах присутствует высокотемпературный пирротин гидротермального генезиса (ст. 1124 и 1158). Минералогические аномалии на этом участке корре-

спондируются с гидрохимическими аномалиями (ст. 1159). Судя по ассоциируемым с пирротинном породообразующим минералам, возможный высокотемпературный источник находится в поле развития ультрабазитов в районе с координатами:  $5^{\circ}48' - 5^{\circ}52.5'$  с.ш.  $\times$   $33^{\circ}08.6' - 33^{\circ}14'$  з.д. Второй перспективный участок находится в районе поднятия, осложняющего северный борт впадины Маркова, в интервалах глубин 4000–4400 м. К юг-юго-востоку от этого участка находится ряд станций (1104, 1105, 1130, 1134) со стабильно повышенными (в 10–100 раз относительно фона) концентрациями минералов-индикаторов, группирующихся вокруг ст. 1106 с аномально высокими содержаниями этих минералов. Ст. 1106 находится на днище впадины Маркова и характеризует область аккумуляции вещества, сносимого со склонов этого поднятия и прилегающих участков борта самой впадины. На этом участке располагается большая часть станций, на которых выявлены гидрохимические аномалии растворенных в морской воде марганца, железа, меди и цинка. Возможный высокотемпературный гидротермальный источник может находиться в районе с координатами:  $5^{\circ}57.2' - 5^{\circ}54.75'$  с.ш.  $\times$   $33^{\circ}11.45' - 33^{\circ}13.35'$  з.д.

По-видимому, аномальные ст. 1106 и 1146, разделенные фоновой ст. 1136, отражают снос и накопление гидротермального материала в наиболее глубокую часть впадины Маркова из этих двух источников.

Таким образом, помимо установленного в районе впадины Маркова сульфидного оруденения, предположительно метасоматического генезиса, существует ряд признаков, указывающих на возможность обнаружения там массивных сульфидных руд типа “черных курильщиков”.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проект 00–05–64235) и Минпромнауки РФ (ФЦП “Мировой океан”, Госконтракт МО-11(ОО)-П).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пуцаровский Ю.М., Бортников Н.С., Сколотнев С.Г. и др. // ДАН. 2002. Т. 384. № 1. С. 83–88.
2. Базилевская Е.С., Сколотнев С.Г. // ДАН. 2002. Т. 383. № 6. С. 791–795.
3. Демидова Т.А., Сколотнев С.Г., Бортников Н.С., Турко Н.Н. // ДАН. 2003. Т. 392. № 5. С. 660–665.
4. Сколотнев С.Г., Пейве А.А., Бортников Н.С. и др. // ДАН. 2003. Т. 391. № 2. С. 232–238.
5. Ericson D., Ewing M., Wollin G., Heezen B. // Geol. Surv. Amer. Bull. 1961. V. 72. P. 193–286.
6. Мазарович А.О., Соколов С.Ю., Турко Н.Н., Добролюбова К.О. // Рос. журн. наук о Земле. 2001. Т. 3. № 5. (Электронная версия, сайт [www.agu.org/wps/rjes](http://www.agu.org/wps/rjes)).