

## ЛИТЕРАТУРА

1. Колпенская Н.Н., Низяева И.С., Танинская Н.В. и др. Обстановки осадконакопления продуктивных горизонтов верхнеюрских и нижнемеловых отложений восточного борта Большехетской впадины Западно-Сибирской плиты // Геология нефти и газа. — 2014. — № 6. — С. 2–10.
2. Муромцев В.С. Электрометрическая геология песчаных тел литологических ловушек нефти и газа. — Л.: Недра, 1984. — 260 с.
3. Шиманский В.В., Танинская Н.В., Колпенская Н.Н. Методические аспекты прогноза неструктурных ловушек углеводородов на примере юрско-меловых отложений Западной Сибири // Бюлл.МОИП. Отдел геологический. — 2014. — Т. 89. — Вып. 4. — С. 24–39.

4. Reading H.G., Richards M. Turbidite systems in deep-water basin margins classified by grain size and feeder system // American Association of Petroleum Geologists Bulletin. — 1994. — V. 78. — No. 5. — P. 792–822.

© Коллектив авторов, 2016

Танинская Надежда Владимировна // tannv@yandex.ru  
Шиманский Владимир Валентинович // shimvid@mail.ru  
Колпенская Наталья Николаевна // natkolp@mail.ru  
Низяева Ирина Сергеевна // nieva\_irina@mail.ru  
Васильев Николай Яковлевич // vasilevnya@mail.ru

## ГЕОФИЗИКА

УДК 550.839:550.8.05+551.2.03

Мезенцева А.Е. (Восточный научно-исследовательский институт золота и редких металлов, ООО «ВНИИ-1»)

### ВРАЩАТЕЛЬНАЯ ДИНАМИКА ЗОЛОТОСУЛЬФИДНОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ: ФАЗОВО-СТРУКТУРНЫЙ ПОДХОД К ПЕТРОФИЗИКЕ

*Исследована числовая модель золотосульфидного месторождения в двух характеристиках пород — электрической поляризуемости и магнитной восприимчивости. В фазовом пространстве этих переменных обнаружено вращение фазовых траекторий, выраженное при геометризации в виде циркуляций и вихрей. Впервые определены динамические критерии оруденения на основе вращательной динамики электрических и магнитных свойств вмещающих пород. **Ключевые слова:** золотосульфидное месторождение, электрическая поляризуемость, магнитная восприимчивость, фазовые траектории, вихрь, циркуляция, динамические критерии.*

Mezentseva A.E. (Eastern Research Institute of Gold and Rare Metals, VNII-1)

### ROTATIONAL DYNAMICS OF THE GOLD SULFIDE DEPOSIT: PHASE STRUCTURAL APPROACH TO PETROPHYSICS

*A study of numerical models for gold sulphide deposit in two properties of rocks, electric polarizability and magnetic susceptibility, has been done. Rotation of the phase trajectories in the system of these variables expressed in the geometrical space as circulations and vortices has been discovered. For the first time dynamic criteria for the ore mineralization based on rotational dynamics of electrical and magnetic properties of enclosing rocks have been identified. **Key words:** gold sulphide deposits, electrical polarization, magnetic susceptibility, the phase trajectories, circulations, vortices, dynamic criteria.*

При изучении месторождений золота, руды и околорудные метасоматиты которых характеризуются тонкими структурно-текстурными и вещественными переходами и не аномальны по физическим свойствам, актуальность вопросов, касающихся макроструктуры и динамики месторождений, особенно велика. На таких объектах при обработке числовых характеристик пород

методами математической статистики обнаруживается (с какой бы тщательностью мы ни делали выборки) полимодальность гистограмм каждой из переменных, а для парных зависимостей характерна высокая дисперсия или неоднозначность и нелинейность за счет неявных частных совокупностей. Связано это, прежде всего, с отсутствием в статистических распределениях пространственной составляющей [6]. Этого недостатка удастся избежать при фазово-структурном подходе к числовой информации, в котором в качестве инструмента используется адаптированный к геологическим задачам способ фазовых траекторий, применяемый для исследования нелинейных динамических систем. Фазовые траектории, в том числе *лепестковые* и *циклические* траектории рудоносной части месторождения, меняют положение в фазовом пространстве при сохранении своего типа [5], т.е. обладают *фазовой динамикой*.

*Целью данного исследования* является выявление фазово-структурным методом макроструктурности (масштаб 1:10 000) и динамики формирования месторождения в фазовом и геометрическом пространствах двух переменных: *электрической поляризуемости  $\eta$  и магнитной восприимчивости  $\chi$* , и, как следствие, определение динамических критериев оруденения.

Числовая модель двух вышеуказанных переменных  $\eta$  —  $\chi$  для исследования представлена серией вертикальных разрезов и погоризонтных планов в изолиниях, построенных по регуляризованному массиву их осредненных значений. Решались следующие задачи:

1. Выявление закономерностей в фазовой динамике лепестковых и циклических структур в системе переменных  $\eta$  —  $\chi$ ;
2. Отображение динамики фазовых структур в геометрическом пространстве;
3. Разделение динамических структур по типам;
4. Схема структурно-динамического формирования месторождения и *динамические критерии оруденения*.

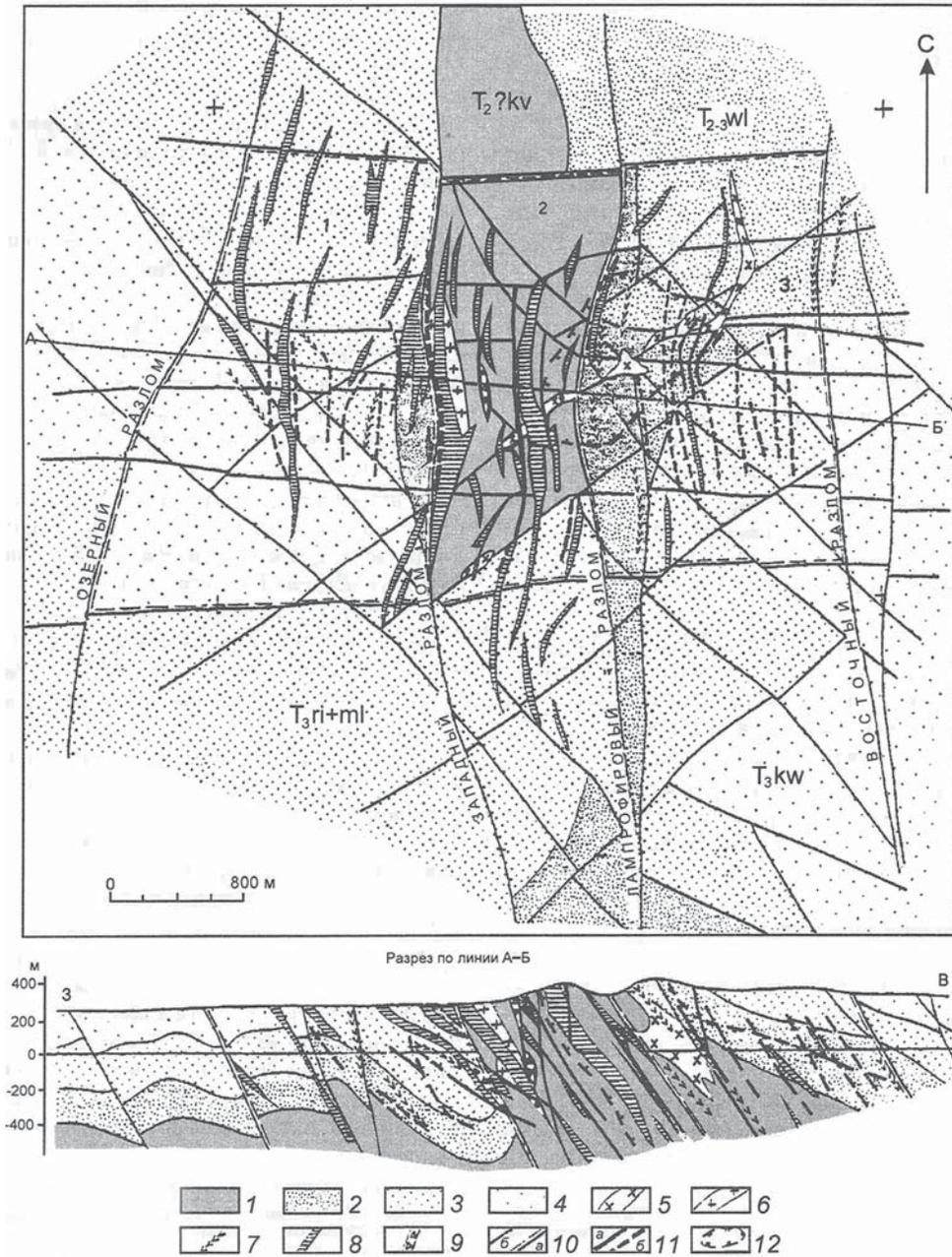
Месторождение находится в области пересечения структур меловой тектоно-магматической активизации на западной периферии Охотско-Чукотского вулканического пояса (ОЧВП) северо-северо-восточного направления и структур северо-западного, местами субширотного простиранья, связанных с формированием мезозойд. В районе преобладают терригенно-осадоч-

ные отложения триаса мезозойского миогеосинклинального комплекса, подвергнутые зеленосланцевому метаморфизму. В купольных структурах, связанных с гранитоидными интрузиями, одна из которых (Кукеевская интрузия) находится в 8 км восточнее месторождения, метаморфизм доходит до стильпномелановой субфации. Аналогичные локальные проявления прогрессивного метаморфизма связаны с термальными

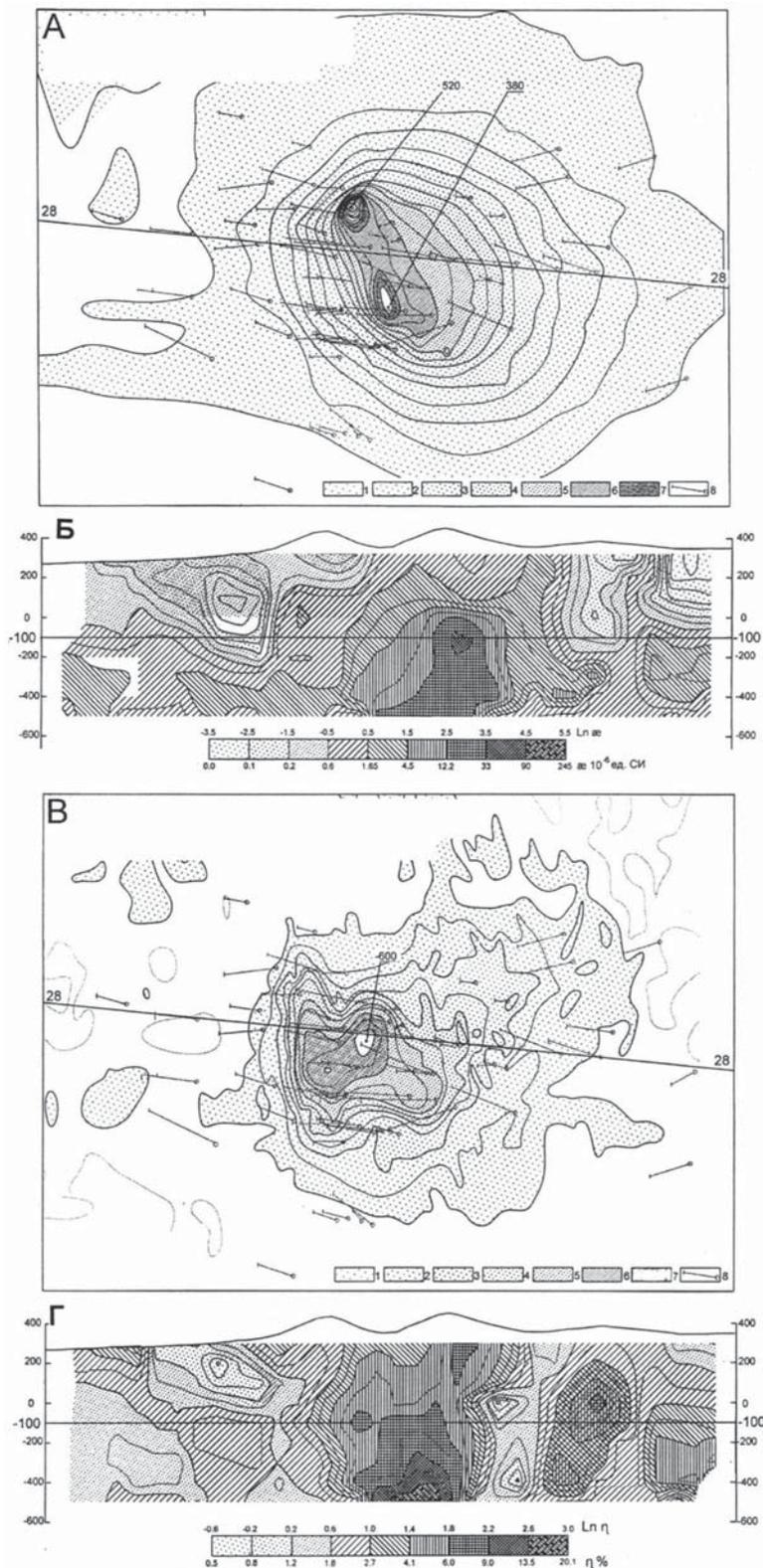
куполами рудных полей и сопровождают описываемое месторождение. Геологическое описание месторождения подробно приводится в работах [1, 2]. Из этих источников на рис. 1 приведена схематическая геолого-структурная карта и разрез исследуемого золотосульфидного месторождения.

**Геофизические особенности золотосульфидного месторождения** [7] заключаются в наличии магнитной аномалии  $\Delta Z$  и аномалии естественного электрического поля  $U_{EP}$  (рис. 2). Сложная двухпорядковая магнитная аномалия занимает центральную часть месторождения и имеет округлую форму. Часть магнитных образований имеет глубинный характер. По расчетам, при аппроксимации крутопадающим стержнем вертикальный размах составляет более 3 км, диаметр на глубине 1500 м — приблизительно 200 м, а расчетная магнитная восприимчивость  $\chi$  — около  $2000 \times 10^{-6}$  ед. СИ. Магнитные породы верхней части разреза создают локальный аномальный эффект до 520 нТ. Этот локальный магнитный объект имеет вытянутую форму, протяженность 750 м в субмеридиональном направлении (рис. 2, А). В разрезе вдоль буровой линии 28 изолиний магнитной восприимчивости локальному объекту отвечает область повышенных значений  $\chi$  с максимумом на глубине минус 150 м  $\sim 90 \times 10^{-6}$  ед. СИ (рис. 2, Б). В других разрезах магнитная восприимчивость достигает нескольких сотен, умноженных на  $10^{-6}$  ед. СИ.

Аномалия естественного электрического поля  $U_{EP}$  имеет интенсивность до  $-600$  мВ, изометричную форму, площадь  $\sim 2$  км<sup>2</sup> (рис. 2, В). Электрическая поляризуемость пород, вызывающих эту аномалию, достигает 20 % (рис. 2, Г). Породы, обладающие аномально высокой поляризуемостью, распространяются от поверхности до глубины более 1000 м и структурно связаны с объектом высокой магнитной восприим-



**Рис. 1. Геолого-структурная схематическая карта и разрез Майского месторождения** (составлена Ю.И. Новожиловым и А.М. Гавриловым с использованием материалов Майской ГРЭ) [2]: 1 — кукеевская свита ( $T_2$  kv): переслаивающиеся мелкозернистые песчаники, алевролиты, алевроглинистые сланцы; 2 — ватапваамская свита ( $T_{2-3}$  wt): переслаивающиеся разнозернистые песчаники, песчаные алевролиты, алевролиты; 3 — релкувеевская и млелювеевская свиты нерасчлененные ( $T_3$  ri+mi): переслаивающиеся мелкозернистые песчаники, алевролиты; 4 — кукеевская свита ( $T_3$  kw): песчаные алевролиты, песчаники, гравелиты, мелкогалечные конгломераты, редкие прослои известняков; *дайки*: 5 — гранодиоритов и гранит-порфиров, 6 — аплитов, 7 — лампрофиров, 8 — риолит-порфиров; 9 — эксплозивные брекчии; 10 — разрывные нарушения: а — блокоразграничивающие, б — прочие; 11 — рудные тела: а — выходящие на поверхность, б — «слепые»; 12 — контур повышенного термального метаморфизма и гидротермального изменения пород



**Рис. 2. Геофизические аномалии золотосульфидного месторождения** (по материалам [1, 7] с дополнениями). А — магнитное поле  $\Delta Z_a$ ; Б — разрез изолиний магнитной восприимчивости пород ( $\chi$ ); В — естественное электрическое поле  $U_{ЕП}$ ; Г — разрез изолиний электрической поляризуемости пород  $\eta$ . Значения  $\Delta Z_a$ , нТ: 1 — (0–50), 2 — (50–100), 3 — (100–150), 4 — (150–200), 4 — (200–250), 5 — (250–300), 6 — (300–450), 7 — (450–500); 8 — горизонтальные проложения скважин, по которым отобраны образцы пород для измерения магнитной восприимчивости. Значения  $U_{ЕП}$ , мВ: 1 — (0–50), 2 — (50–100), 3 — (100–150), 3 — (150–200), 4 — (250–300), 5 — (300–350), 5 — (350–400), 6 — (450–500), 7 — >500; 8 — горизонтальные проложения скважин, по которым отобраны образцы пород для измерения поляризуемости

чивости, поэтому могут сопровождать их и на большей глубине.

Носителем магнитной восприимчивости на месторождении является преимущественно пирротин, имеющий наряду с другими сульфидами гидротермальное и контактово-метасоматическое происхождение. Поляризуемость, иногда называемая электрической восприимчивостью пород, как известно, влияет на химизм минералообразования за счет *электрохимической активности* сульфидов, преимущественно пирита, отчасти углистого вещества и газовой-жидкой среды.

**Методика.** Фазово-структурный метод исследования числовых моделей месторождений заключается в следующей последовательности операций [5].

1. Регуляризация исходных данных (в данном случае значений физических свойств образцов пород из скважин и горных выработок) с одновременным осреднением в трехмерном пространстве (например, сферой) скользящим окном по направлениям  $X, Y, Z$ .

2. Построение планов и разрезов изолиний осредненных значений каждой из двух переменных. Сечения изолиний обозначены цифрами в порядке возрастания значений по одной переменной и буквами — по другой.

3. Совмещение разрезов (планов) изолиний двух переменных и получение криволинейных ячеек с двойным индексом, либо построение спектров значений по одной и другой переменной для их исследования вдоль выбранных направлений (например, вдоль горизонтов на разрезах или вдоль буровых линий на планах).

4. Составление прямоугольной системы координат, т.е. фазового пространства тех же двух переменных; интервалы значений по осям соответствуют интервалам значений между изолиниями на планах и разрезах, в цифрах по одной оси, в буквах — по другой.

5. Построение фазовых траекторий в двумерном фазовом пространстве переменных по последовательностям ячеек в выбранных направлениях (п. 3).

6. Систематизация фазовых траекторий по типам, выяснение отношения к рудоносным образованиям и последующая геометризация фазовых структур, их характерных элементов, в том числе экстремумов лепестковых структур, трассирующих рудные зоны месторождения [5].

Следует отметить, что поскольку траектории строились по изолиниям осредненных значений переменных [4, 5], каждая точка (ячейка) траектории статистически представительна как среднее из измерений нескольких десятков проб. Поэтому траектория может рассматриваться как линия регрессии (корреляции) прямой, обратной или более сложной зависимости значений двух переменных.

Совокупность траекторий определенного типа является фазовым описанием, или фазовым портретом соответствующей петрофизической структуры. На планах и разрезах (т.е. в геометрии) изолиний одного из выбранных физических свойств эти структуры выражены неявно. Окончить их можно в двух физических свойствах: сначала как *структуры фазовые*, а затем их «геометризовать» и получить петрофизические структуры на планах и разрезах. Исследование фазовой динамики петрофизических структур потребовало разработки специальных методических приемов (в дополнение к вышеперечисленным), которые будут описаны по мере решения поставленных задач.

**1. Выявление закономерностей в фазовой динамике лепестковых и циклических структур в системе переменных  $\eta - \chi$ .** Построим и рассмотрим в сравнении серию фазовых траекторий *лепесткового типа*. Охарактеризуем динамику вращения лепестковой структуры в разрезе 28 западного фланга месторождения (рис. 3, а–в). На рис. 3а можно видеть, что угол поворота лепестков от траектории +300 м к траектории 0 м составляет  $81^\circ$ . Вращение продолжается (рис. 3б) от траектории 0 м к траектории –200 еще на  $25^\circ$  и от траектории –200 к траектории –400 — на  $58^\circ$  (рис. 3в). Отметим, что, начиная с траектории –100, происходит трансформация лепестковых фазовых траекторий в циклические, которые также имеют момент вращения. В качестве сравнительной характеристики траекторий введем *показатель углового вращения* в град./км. Расстояние между крайними траекториями составляет 700 м, а суммарный угол поворота (тенденционно по часовой стрелке) —  $81^\circ + 25^\circ + 58^\circ = 164^\circ$ . Значит, показатель вращения равен  $164^\circ : 0.7 \text{ км} = 234 \text{ град./км}$ . Интересно, что та же лепестковая фазовая структура западного фланга в горизонтальной плоскости –100 м имеет показатель углового вращения траекторий  $84 \text{ град./км}$ , что в 2.8 раза ниже, чем в разрезе.

Следует заметить, что на рис. 3а можно видеть некоторые усложнения в экстремумах лепестков, являющихся фазовым местом рудовмещающих зон смятия и дробления [3, 4, 5]. Усложнения траекторий вызваны вариациями физических свойств в связи с процессами окисления этих зон в верхних частях разреза.

На рис. 3г (разрез 28, восточный фланг) можно видеть, что угол поворота траекторий последовательно наращивается от траектории +300 к траектории +200 и т.д. до траектории 0 и составляет  $26^\circ$ . На

рис. 3д вращение продолжается по часовой стрелке от траектории 0 до траектории –300. Здесь траектории лепесткового типа преобразуются в траектории циклического типа, продолжая вращение, угол которого составляет  $38^\circ$ . В сумме от горизонта +300 до горизонта –300 угол вращения —  $26^\circ + 38^\circ = 64^\circ$ . Расстояние между крайними траекториями 600 м, показатель углового вращения  $64^\circ : 0.6 \text{ км} = 107 \text{ град./км}$ . Ту же фазовую структуру лепесткового типа теперь рассмотрим в горизонтальной плоскости (рис. 3е, план –100 м, восточный фланг) по серии фазовых траекторий вдоль буровых линий 20, 28, 36, 44, 52. Расстояние между буровыми линиями (и траекториями) составляет 160 м. Поворот лепестков происходит тенденционно по часовой стрелке от траектории 52 на севере к траектории 20 на юге. Суммарный угол поворота составляет  $53^\circ$  на 640 м между крайними траекториями. Значит, показатель углового вращения составит  $83 \text{ град./км}$ , что ниже чем в разрезе в 1.3 раза.

Итак, лепестковые фазовые траектории (включая примыкающую часть траекторий циклического типа) обладают вращательным моментом. *Показатель углового вращения* в град./км показал, что наиболее интенсивной является динамика вращения фазовых структур на за-

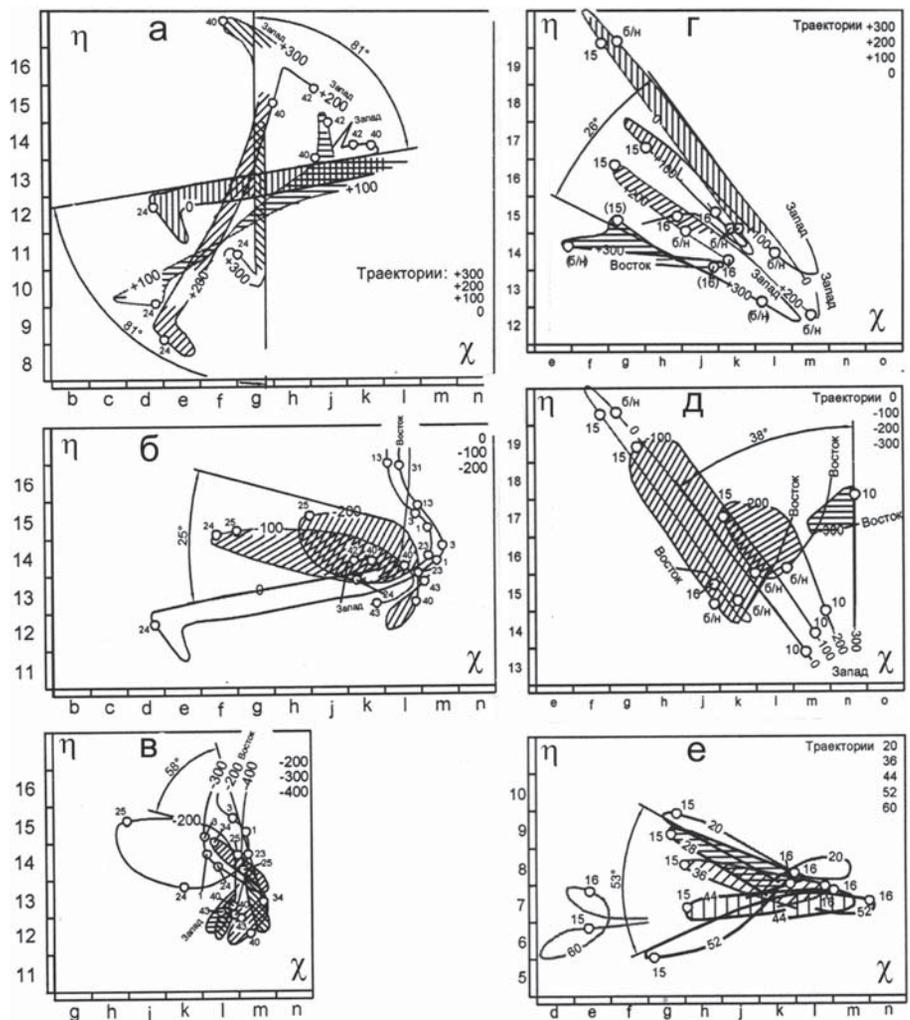


Рис. 3. Вращение фазовых траекторий в разрезе по буровой линии 28 (а–д) и в плане –100 м (е)

падном фланге месторождения в разрезе (по вертикали), причем в 2,8 раза выше, чем в плане (по горизонтали). На восточном фланге показатель вращения фазовых структур в вертикальном сечении всего в 1,3 раза выше, чем в горизонтальном. Это объясняется различиями в геолого-структурной обстановке (рис. 1). В западной и центральной частях месторождения на фоне повышенного расщепления выделяются крупные ветви интенсивно дислоцированных пород, встречаются эксплозивные брекчии, а наиболее выдержанные промышленные рудные тела связаны преимущественно с зонами пластического течения. На восточном фланге пластические деформации сочетаются с хрупкими и последние нередко преобладают [2]. Аномально высокие показатели углового вращения фазовых структур характерны для наиболее рудоносных блоков месторождения.

**2. Отображение динамики фазовых структур в геометрическом пространстве переменных  $\eta$  —  $\chi$**  производим с использованием *направлений*, или *векторов приращения переменных*. Точку приложения вектора определяем по положению экстремума фазовой траектории на плане или разрезе изолиний  $\eta$  и  $\chi$ . Направление вектора определяем в фазовом пространстве (рис. 3) по тому, вдоль какой оси ( $\eta$  или  $\chi$ ) растут значения экстремумов от одной траектории к другой. В лепестковых структурах при корреляции экстремумов наиболее динамично изменяются значения электрической поляризуемости (рис. 3 а, г, е), а в циклических траекториях — значения магнитной восприимчивости (рис. 3 б, д). Соответственно будем говорить о преобладающих потоках  $\eta$ -векторов в лепестковых структурах и потоках  $\chi$ -векторов — в циклических структурах при геометризации. В результате получаем *поле направлений приращения переменных*, или *векторную картину* в плане и разрезе месторождения, на основании которых решаем следующую задачу.

**3. Разделение динамических структур по типам.** На планах и разрезах векторы группируются по морфологии и направлению, по которым можно определить тип вращательной структуры. На рис. 4 приведена векторная картина и составленная на ее основе структурно-динамическая схема золотосульфидного месторождения в плане -100 м и в разрезе вдоль буровой линии 28. На месторождении выявлены два типа вращательных структур — *вихревые* и *циркуляционные*. *Вихревые структуры* выделены по дугообразному выстраиванию преимущественно  $\chi$ -векторов с их тенденциозным закручиванием в области размером 400 — 700 м в поперечнике. Вихревые структуры находятся среди малоамплитудных циклических фазовых структур, имеющих хаотический характер, которые полосой размещаются вдоль границ месторождения. В их пределах рудные тела ветвятся и выклиниваются [5]. Траектории вихревых структур более вытянуты, чем циклические, и имеют вращение в фазовом пространстве. Вихревые структуры также рудоносны. *Циркуляционные структуры вращения* являются геометрическим отображением лепестковых фазовых структур. Между тремя экстремумами лепестковых траекторий, соответствующими двум основаниям и вершине лепестка, траектории субпараллельны и линейны. При геометризации обнару-

живается, что на линейных участках траекторий лепесткового типа рудные тела не встречаются. Это ядра, вокруг которых происходит фазовое вращение экстремумов лепестковых траекторий. Оруденение избегает упорядоченности числовых характеристик. Напротив, оно выбирает участки неопределенности связей переменных в вершинах лепестков и в их основаниях. Именно в таких местах процесс макроструктурирования переходит на микроуровень — уровень минералообразования [4—6]. Геологическая среда по обе стороны от вершины лепестка (рудной зоны) каждой траектории монотонно (без экстремумов) изменяется по физическим свойствам, пока не достигает соседних экстремумов в основаниях лепестка (соседних рудных зон), расположенных справа и слева от первой (рис. 3 а, в, г и рис. 4). Каждая циркуляционная структура представлена парой ячеек, состоящих из ядер и зон циркуляции. Вокруг ядер, характеризующихся монотонными зависимостями переменных, циркулируют потоки  $\eta$ -векторов, выраженных фазовыми экстремумами. В торцевых частях ячеек расположены вихревые структуры, циркуляция в которых продолжается, но уже в вихревых потоках  $\chi$ -векторов. Вихревые и циркуляционные вращательные структуры образуют *циркуляционно-вихревые комплексы* (ЦВ-комплексы) в пределах центрального, западного и восточного блоков месторождения, основные особенности которых описаны в результатах решения следующей задачи.

**4. Схема структурно-динамического формирования месторождения и динамические критерии оруденения.** Полученные эмпирическим путем данные о вращательных структурах месторождения позволяют составить гипотетический сценарий его развития.

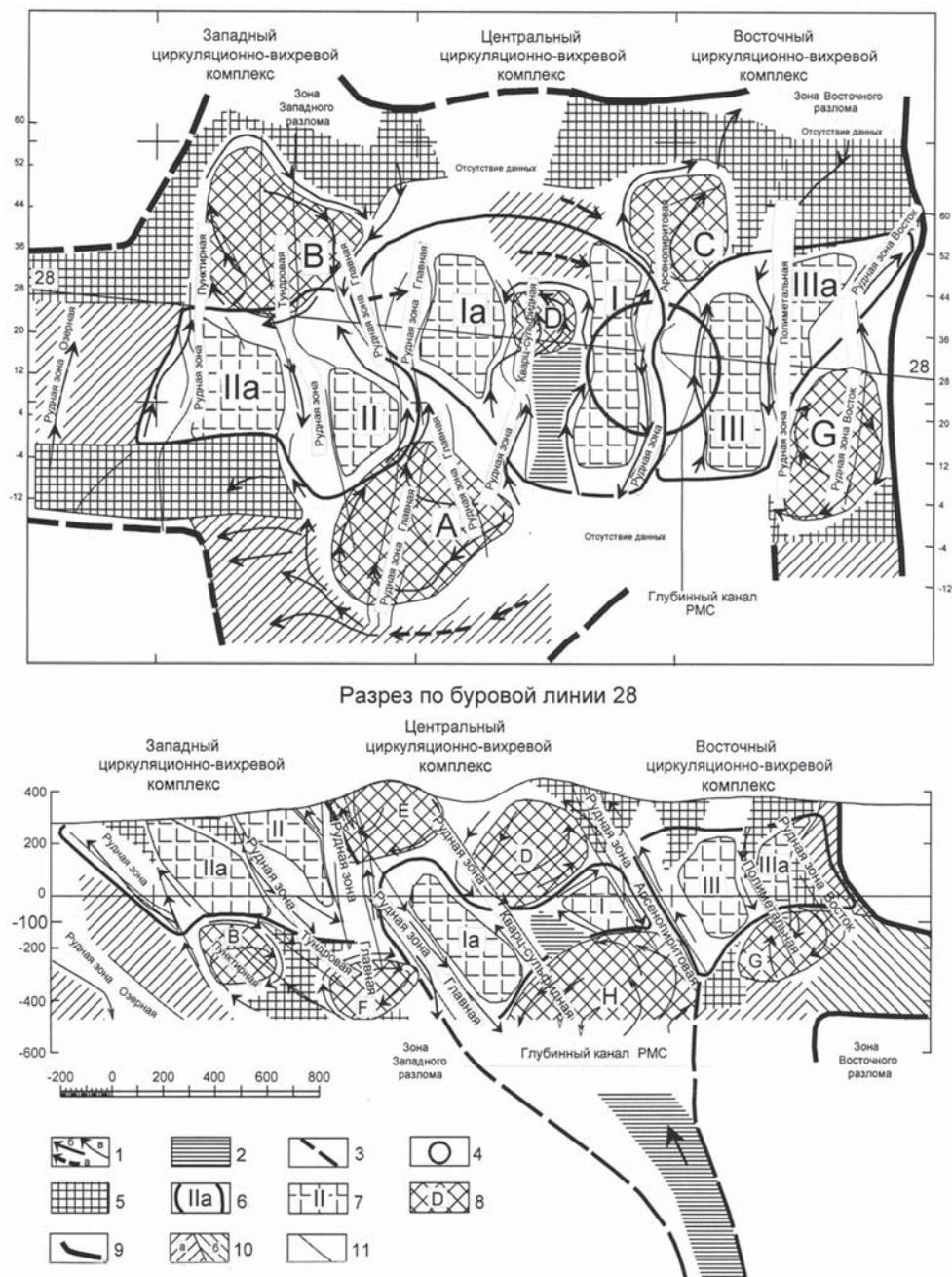
4-1. *Региональные предпосылки.* Первоначальный импульс вращательной динамики связан с формированием Кукнейского гранитоидного массива, находящегося в 8 км восточнее месторождения. Предполагается, что восходящие из глубин магма и потоки флюидов в интрузивно-купольной структуре одновременно вызвали в окрестностях компенсационные *нисходящие потоки*, сопряженные, в частности, с отрицательными тектоническими формами (пликативными и разрывно-дислокационными структурами), впоследствии осложненными локальными положительными формами в условиях напряженной тектоники месторождений. В некоторых местах нисходящие потоки грунтовых, внутрипластовых, порово-капиллярных вод могли сходить с образованием *вихревой воронки*. Скорее всего, именно на стадии нисходящих потоков формируется наибольшее количество разрывных нарушений разных направлений, усиливающих локальную проницаемость толщ на месторождениях. Предполагается также, что в нижней части вихревой воронки на глубине более 1 км формировалась вращающаяся *суперячейка* (некоторые термины заимствованы из аэродинамики) с аномально высокой обводненностью пород. На плане -100 м пунктиром показаны субширотные векторные потоки: на севере вдоль буровых профилей 44—60, они направлены на восток, а на юге вдоль буровых профилей (—4) — (—28) — на запад. Они фиксируют некую изометричную структуру диаметром ~ 1500 м, имеющую правосторон-

нее вращение. Возможно, в физических свойствах пород препарирована динамика правостороннего вращения нисходящих потоков реликтовой суперячейки (в рамках зоны субширотного разлома шириной ~ 2000 м).

4-2. **Метаморфогенный этап формирования месторождения.** Нисходящие потоки вихревой воронки (правосторонней), достигнув высокоградиентного по  $P$ - $T$  условиям уровня в области магматического очага, из-

менили динамику и трансформировались в восходящий вихрь. Первоначально относительно холодные нисходящие воды, перемещавшиеся по вихревой воронке, на глубине превращались в пар, смешивались с глубинными флюидами и обновленные веществом и энергетически переходили во внутреннюю полость воронки (в область низкого давления), устремляясь в верхние горизонты. Вращение на выходе, на уровне

месторождения, стало левосторонним, а поток — расходящимся. **Вихревой жгут** в настоящее время фиксируется как «стержень», состоящий из магнитных пород, который прослеживается до глубины не менее 3 км, а с учетом эрозионного среза достигает 4–5 км по вертикали при диаметре ~100 м. Известно, что вихревые структуры обладают огромной подъемной силой. Своим жгутом, или «хоботом» они способны «всасывать» все, что может перемещаться, включая обломки разрушенных пород (эксплозивные брекчии, являющиеся важной особенностью месторождения [2]), но особенно — газово-паровую и жидкую субстанции. Благодаря подпитке из очаговой структуры, вихревая система могла существовать достаточно долго, пульсируя в зависимости от притока газовой-жидкой составляющей на глубине. Предполагается, что вихревым восходящим потоком транспортировалась остаточная магма (вероятно, из источника, питавшего Кукенейский гранитоидный массив), в результате чего на месторождении образовалось множество даек: раннего этапа, внедрившихся во временной последовательности гранит-гранодиорит-порфиры — аплиты — лампрофиры, и более позднего этапа — субвулканические риолит-порфиры, число которых преобладает. Мощность субвулканических даек убывает от центра к северу и югу (оруденение накладывается на все типы магматических пород и explosive брекчии) [1, 2].



**Рис. 4. Структурно-динамическая модель золотосульфидного месторождения в системе физических переменных  $\eta$  —  $\chi$ :** 1 — векторы возрастания значений переменных в экстремумах фазовых траекторий лепесткового и циклического типов; а — первичной вращательной структуры (вихревой воронки), б — восходящего вихревого потока, в — вторичных вихревых и циркуляционных структур; 2 — магнитные породы восходящего потока (вихревого жгута); 3 — предполагаемый контур восходящего потока (вихревого жгута); 4 — эпицентр вихревого жгута (в плане); 5 — области траекторий циклического типа; 6 — контуры двухъячеечных циркуляционных структур; 7 — ядерные части ячеек циркуляционных структур; 8 — области вторичных вихревых структур; 9 — граница месторождения; 10 — зоны рудоконтролирующих разломов: а — крутопадающих, б — пологих; 11 — рудные тела

Непосредственно в сфере действия вихревого жгута оказался центральный блок месторождения, где наблюдается сочленение разнонаправленных даек. Отмечается незначительный вынос кремнекислоты, фосфора, а также органического углерода и привнесение окислов железа, кальция, магния, углекислоты и сульфидной серы. Вторичные изменения превратили породы в березитоподобные образования вследствие их наложения на ороговикование. Отмечаются узловатые и пятнистые текстуры пород, содержащие зародыши кордиерита (золоторудные тела располагаются вне или на периферии березитоподобных измененных пород). С позиций минералогической стадийности это был метаморфогенный этап, стадия метаморфогенного кварца, с соответствующим химическим и термодинамическим режимом: высокие концентрации  $\text{CO}_2$  (60–95 %) при  $T = 400 - 200$  °С, давления  $P = 1100 - 740$  ат [1, 2].

4-3. *Дальнейшее развитие динамической системы месторождения* сопряжено с трансформацией области суперячейки. Восходящий из глубин вихрь (расходящийся с левосторонним вращением) выразился, прежде всего, в формировании циркуляционно-вихревых комплексов.

*Центральный циркуляционно-вихревой комплекс* имеет наиболее сложное строение, находится в направлении восстания глубинного канала, вихревого жгута. Он объединяет вихревые структуры D и H с левосторонним вращением, унаследованным от восходящего вихревого потока, и пару (конвекционных) ячеек I и Ia с одноименными ядрами, вокруг которых циркулируют потоки  $\eta$ -векторов: восходящие — между ядрами (здесь потоки разделены, обтекают магнитные породы глубинного канала, первичного по отношению к циркуляционным структурам) и нисходящие — вдоль западного и восточного обрамления ядер. В плане — 100 м один (раздвоенный) восходящий поток направлен с юга на север и два нисходящих — с севера на юг. Это свидетельствует о некотором дрейфе глубинного вихря в субмеридиональном направлении. Дрейф трассируется узкой локальной магнитной аномалией протяженностью 750 м (рис. 2 А) и полосой магнитных пород вихревого жгута (рис. 4, план). С зонами циркуляции  $\eta$ -векторов совпадают рудные зоны (рудные зоны объединяют на минерально-геохимической основе группы рудных тел). Рудная зона Кварц-сульфидная (рудные тела 2, 2а) совпадает с восходящими потоками  $\eta$ -векторов в интервале глубин (–100) — (–300) м. В остальной части она находится в области вихревых структур: снизу H, сверху D (и частично E). С нисходящими потоками связаны рудные зоны Главная (пологие рудные тела 13, 31) и Арсенопиритовая (ее часть с рудным телом 9).

Характер взаимодействия вихревых и циркуляционных структур (оставляя в стороне физику процессов) заключается в следующем. Относительно стабильные безрудные ядра ячеек I и Ia разделены восходящими потоками  $\eta$ -векторов (рис. 4). Достигнув некоторого максимума вверху (разрез) и на севере (план), процесс становится вихревым (структура D), в которой (за счет накопленной электрической составляющей) в вихре  $\chi$ -векторных потоков возрастает магнитная составля-

ющая. Через некоторый пространственно-временной промежуток это дает импульс к новому возрастанию электрической поляризуемости и ее циркуляции, начиная с минимума значений, в нисходящих потоках  $\eta$ -векторов. После таких многократных импульсных возражений попеременно то электрической, то магнитной активности потоков сформировались рудные тела зон Арсенопиритовой и Главной. Максимальных значений в этих зонах поляризуемость достигает внизу (разрез) и на юге (план), где они вновь накопленную электрохимическую активность реализуют в вихревой структуре H с  $\chi$ -векторными потоками. Здесь вновь накапливается магнитный компонент, чтобы через некоторый пространственно-временной отрезок возник импульс к возрастанию электрохимической активности, а в зоне  $\eta$ -векторного восходящего потока таким образом постепенно формировались рудные тела Кварц-сульфидной зоны.

Центральный циркуляционно-вихревой комплекс своим функционированием обеспечил редкометалльный этап рудообразования, разделяющийся на две стадии: молибденит-кварцевую и вольфрамит-кварцевую. Он проходил в условиях концентрации NaCl 40 — 50 %,  $T = 380 - 180$  °,  $P = 1410 - 1000$  ат. Минеральные ассоциации этого этапа: кварц-серицитовая, молибденит-кварцевая и вольфрамит-кварцевая [1]. Авторы [2] выделяют четыре стадии раннего этапа рудообразования: серицитолитовую, молибденит-кварцевую, вольфрамит-кварцевую и кварц-карбонат-полисульфидную (сереброносную).

*Западный циркуляционно-вихревой комплекс* объединяет вихревые структуры A, B, E, F с правосторонним вращением и пару ячеек II и IIa с одноименными ядрами, вокруг которых циркулируют потоки  $\eta$ -векторов: один нисходящий между ядрами и два восходящих вдоль западного и восточного обрамлений ядер. Рудная зона Пунктирная (рудные тела 40, 42) и рудная зона Главная (рудные тела 1, 3, 23) совпадают с восходящими потоками в интервале глубин –200) — (+300) м. В остальной части они находятся в области воздействия вихревых структур: на глубине (разрез) вихревых структур B и F, сверху — вихревой структуры E, на юге (план –100 м) — вихревой структуры A и на севере — B.

С нисходящими потоками связана рудная зона Тундровая (рудные тела 24, 35) до глубины 500 м от поверхности. На более глубоких горизонтах она находится в области вихревой структуры F, а вверху — в области циклических траекторий, частично эродированной.

*Восточный циркуляционно-вихревой комплекс* объединяет вихревые структуры C и G, имеющие правостороннее вращение, и пару ячеек III и IIIa с одноименными ядрами, вокруг которых аналогично с западным ЦВ-комплексом циркулируют потоки  $\eta$ -векторов: один нисходящий (сверху вниз) между ядрами и два восходящих (снизу вверх) по внешнему контуру ядер. Рудные зоны Арсенопиритовая (рудное тело 10) и Восток (рудное тело 16) совпадают с восходящими потоками в интервале глубин (–250) — (+300) м, в остальной части находятся в области вихревых структур. С нисходящим потоком связана рудная зона Полиметалльная (рудное тело 15).

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., Сюжюмов 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.<sup>2,1</sup>, Гусева Ю.Б.<sup>3</sup>, Гандюхин В.В.<sup>3</sup> (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.<sup>1,2</sup>, Guseva Yu.B.<sup>3</sup>, Gandyukhin V.V.<sup>3</sup> (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