

УДК 910 : 911

© А. М. ЖЕЛЕЗНОВ

ОСОБЕННОСТИ ГЕОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛОЖЕНИЯ И ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТИ ОРУДЕНЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ГИДРОТЕРМАЛЬНОЙ АКТИВНОСТИ В ПРЕДЕЛАХ ОСЕВОЙ ЗОНЫ СЕВЕРО-АТЛАНТИЧЕСКОГО ХРЕБТА

Наибольшее число крупных полей гидротермальных полиметаллических сульфидов (ГПС) известно в пределах рифтовой долины Северо-Атлантического хребта (САХ). Расположение полей ГПС в осевой зоне хребта, несмотря на общее геодинамическое единство этой зоны, обусловленное процессом медленного океанического спрединга, показывает значительное разнообразие обстановок рельефообразования. С учетом опубликованных детальных описаний рельефа (например, [1, 9, 10]) стало возможным предложить предварительную классификацию геоморфологической позиции наиболее изученных гидротермальных систем.

В соответствии с их генезисом допустимо разделить формы рельефа САХ на основные группы комплексов, характеризующиеся различным геодинамическим режимом с локальным преобладанием одного из типов рельефообразующих процессов: вулканизма (магматогенные), тектонических движений (тектоногенные), преобразования форм рельефа в процессе осадконакопления (экзогенные) или метаморфизма (метаморфогенные).

Рассмотрим положение известных полей ГПС осевой зоны САХ в части разделения групп магматогенных и тектоногенных структур на отдельные подгруппы по особенностям их морфологии. Изучение развития экзогенных и метаморфогенных рудоконтролирующих структур вынесено за рамки представленной схемы и данной публикации в целом. В изложении материала используется нумерация подразделов в соответствии с номерами структур на схеме (табл. 1).

Магматогенные структуры. Положение магматогенных комплексов форм рельефа не являлось основным объектом исследования в рамках данной работы и приводится в краткой форме исключительно для сопоставления этих структур по масштабам и распространенности с тектоногенными.

1. Одной из наиболее изученных является группа рудопроявлений неовулканической зоны. Рудные поля Снейк Пит и Брокен Спур были открыты в 1990-е гг. Их северным аналогом является рудопроявление Стейнахолл (хребет Рейкьянес). Неовулканическая зона является наиболее молодой частью рифтовой долины, что обуславливает возникновение здесь объектов не только вулканической, но и гидротермальной активности.

Таблица 1

**Общая схема возможных позиций гидротермальных систем
на эндогенном рельефе САХ**

По генезису структур	Магматогенные	Тектоногенные
По морфологии и положению в рифтовой долине	1. Неовулканическая зона 2. Крупные стратовулканы 3. Переходные участки подножья и перемычек 4. Привершинные участки первой гряды	1. Осевые горсты 2. Нетрансформные внешние 3. Поверхности сбросов-детачментов склоновые пороогообразные 4. Переходные внутритрансформные

2. При малых скоростях спрединга ограниченное выделение магмы не приводит к формированию значительного числа вулканических конусов, что сказалось на малочисленности этой группы. Гидротермальные постройки на отдельных конусах приурочены к кальдерам крупных вулканов центрального типа. Типичным представителем этой подгруппы является вулкан Пью-де-Фолль. Другое интересное поле ГПС Лаки Страйк состоит из трех вулканических конусов, сформированных на более древнем поднятии. Также к этой группе относятся интересное поле Менез Гвен, конус вулкана которого был разорван рифтом на две половины. За счет этого отдельные половины сходны по морфологии с тектоногенными структурами, несмотря на вулканическое происхождение. На формирование перечисленных вулканов, с большой долей вероятности, повлияло близкое положение «горячих точек» (Азорские острова, острова Зеленого мыса). Подобные рудоконтролирующие вулканы открыты германскими исследователями в рифтовой долине также в районе 4°48' ю. ш.

3. Переходное положение занимают гидротермальные поля Краснов и Мойтирра. Первое расположено на «плотине» — уникальном перешейке от вулканического поднятия к склону рифтовой долины. Второе смещено к основанию «внутренней стенки» долины, что также не имеет аналогов. Условия образования таких полей требуют дополнительных исследований, а геоморфологическое положение — безусловного внимания и поиска аналогичных обстановок.

4. Только в отечественных экспедициях и лишь в последние годы были открыты поля ГПС на базальтовых гребнях флангов САХ (Зенит-Виктория, Сюрприз, Юбилейное). Они приурочены к привершинной части первой рифтовой гряды (как западного, так и восточного склона рифтовой долины). Обнаружение таких полей по геоморфологическим признакам требует привлечения дополнительных инструментов интерпретации линеаментного анализа и подробного изучения данных гидролокации бокового обзора (ГБО), что обусловлено значительной распространенностью подобных обстановок.

Тектоногенные структуры. Группа тектоногенных комплексов форм рельефа не менее представительна, чем магматогенных. Условно ее можно разделить на две подгруппы:

— гидротермальных проявлений на своеобразных выступах — «аппендиксах» различных по происхождению структур, приуроченных к зонам смещения рифтовой долины;

— гидротермальных проявлений на склонах гофрированных поверхностей пологонаклонных сбросов — аналогов континентальных детачментов.

Необходимо отметить, что эти специфические особенности (наличие «аппендиксов» или гофрированных склонов) обеих подгрупп не встречаются среди магматогенных комплексов форм рельефа.

Каждую из этих подгрупп все же необходимо разделить в силу отдельных принципиальных различий между полями ГПС тектоногенных структур САХ. Так, все гидротермальные выходы на «аппендиксах» при внешне очевидном сходстве геоморфологической позиции при крупномасштабном картографировании приурочены к совершенно разным по генезису тектоногенным комплексам форм рельефа.

1. Пока считается уникальным горстовый приосевой хребет Рейнбоу вдоль осевого простираения вблизи нетрансформного смещения рифтовой долины, к которому приурочено одноименное поле ГПС. Осевое поднятие нетипично для САХ, так как оно является серпентинитовой протрузией без следов вулканизма [10].

Подобные хребту Рейнбоу горстовые структуры большего размера характерны для зон сочленения рифтовой долины с трансформными разломами, причем благодаря своим физическим свойствам в такой подъем диапировых протрузий на поверхность вовлечены преимущественно ультрамафические породы. Согласно работе [6], для поперечных хребтов трансформных разломов характерно преобладание вертикальных движений и габбро-перидотитовый состав без участков наложенного магматизма.

Если строение вдольосевого поднятия Рейнбоу действительно подобно разрезу поперечных хребтов, сложенных серпентинизированными перидотитами и габброидами, то следует ждать обнаружения крупных протрузий и в других зонах нетрансформных смещений. Например, требует дополнительного оконтуривания и изучения габбро-перидотитовое поднятие западное поля Петербургское.

2. Другие поля ГПС, приуроченные к нетрансформным смещениям, находятся непосредственно в пределах этих смещений (Петербургское, Салданыя, схожее с ними поле Нибелунген). Таким образом, поле Рейнбоу можно назвать внутриваловым, а Петербургское и Салданыя — внеосевыми.

Поле ГПС Петербургское было открыто одним из последних на второй рифтовой гряде западного фланга САХ в месте ее разрыва крупным нетрансформным смещением, в котором рифтовая долина имеет кулисообразное строение. Отсутствие подобных гидротермальных систем на других участках фланговых рифтовых гор свидетельствует о ключевой роли нетрансформного смещения. Поэтому вполне уместно предполагать положение оси палеорифта между современными второй и первой рифтовыми грядами, которое изменилось в результате подъема блока плутонических пород к западу от рудопроявления.

3. Следующей группой рудоконтролирующих морфоструктур являются сложносоставные формы рельефа, которые можно назвать поднятиями внутренних океанических комплексов (ВОК, подобный перевод термина «*oceanic core complex*» используется по [5]). Непосредственно внутренним океаническим комплексом является комплекс пород габбро-перидотитовой ассоциации, слагающих эти прифланговые поднятия. На склонах ВОК, хорошо заметных на батиметрических картах, сторона, обращенная к оси хребта, обычно выположена и отличается специфичным гофрированным микрорельефом. При этом именно по этому склону и обнажаются глубинные породы. Многочисленные геологические исследования (например, [7, 15] и мн. др.) доказывают, что такие склоны являются поверхностью срыва детачмента. По разло-

мам океанических детачментов подобно аналогичным структурам в офиолитовых комплексах проявляется эффект «тектонического окна», условия формирования которого отличаются от классической модели симметричного спрединга. Такая геодинамическая картина в профиле рифта довольно подробно описана зарубежными геологами в модели спрединга «Чапман» [8].

На поверхности ВОК, кроме ниже-коровых и мантийных пород, могут наблюдаться вулканические гряды палеодна рифтовой долины и свежие вулканические выходы даек, что, на наш взгляд, взаимно отражает стадии начала и завершения тектонической активности. Наши совместные исследования с зарубежными коллегами показывают, что изменение морфологии ВОК не останавливается после угасания сейсмичности. Значительное экзодинамическое воздействие эти формы испытывают уже по мере отодвигания от оси хребта во фланговые зоны, что не мешает им сохранять характерные отличия на протяжении миллионов лет.

ВОК при схожести геологического строения имеют принципиальные различия в морфологии. На наш взгляд, их следует разделять как минимум на две подгруппы: склоновые террасообразные и пороогообразные.

3а. Террасообразные ВОК широко распространены и давно известны как аномальные уступы. При этом они участвуют в формировании склонов рифтовой долины САХ не реже классических базальтовых гряд. Изучение морфологии внутрибортовых ВОК показывает, что амагматические сегменты занимают до половины поверхности дна рифтовой долины САХ [16]. В такой тектонической обстановке сформировались крупные гидротермальные поля ТАГ, Логачев, Ашадзе, Впадины Маркова и другие, в том числе ВОК на ультрамедленных хребтах Индийского и Северного Ледовитого океана.

3б. Принципиально отличается от большинства выходов детачментов подгруппа пороогообразных ВОК — крупных поднятий, которые формируют своеобразные округлые барьеры на участке повышенной сейсмичности между одним из «бортов» и осевой частью рифтовой долины. Такие всплывающие блоки формируются, вероятно, при асимметричном амагматическом перемещении оси рифтовой долины вблизи крупных нетрансформных смещений. Наиболее изучены пороогообразные ВОК в районе $13^{\circ}19'$ — $13^{\circ}30'$, где на двух ВОК сформировался целый ряд объектов ГПС. Аналогом такой структуры является ВОК Ван-Дамм на хребте Кайман в западной Атлантике.

4. Промежуточное положение между двумя группами тектоногенных структур занимает рудное поле Лост Сити. Рудоконтролирующей структурой является поднятие внутреннего угла трансформного разлома Атлантик, которое признано одним из эталонов внутрибортовых ВОК. Историю развития этой угловой горы восстанавливают по данным проекта глубоководного бурения IODP [14]. С другой стороны, подобно полям Петербургское, Салданья, Нибелунген и Рейнбоу само поле Лост Сити находится на выступе — «аппендиксе», который выдается непосредственно в трансформный разлом. В некоторой степени аналогом Лост Сити можно считать поле ГПС в разломной зоне Гримсей, расположенной в месте сочленения срединно-океанического хребта Кольбейнсей с северным окончанием о-ва Исландия.

Продолжительность рудообразования полей ГПС и их положение в рельефе рифтовой долины. Для большинства из упомянутых выше полей ГПС Атлантики продолжительность гидротермальной деятельности оценена с применением $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -датирования образцов руд. Абсолютное большинство $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -датировок объектов ГПС Северной Атлантики получено в

СПбГУ (опубликованы в [2, 3, 9, 11, 12] и других работах), для отдельных объектов есть результаты зарубежных исследований (например, [13, 14]).

Самое общее сравнение максимальных датировок позволяет разделить все поля ГПС на 3 группы:

1) с непродолжительной активностью — 5—25 тыс. лет (Снейк Пит, Брокен Спур, Пью-де-Фолль, Рейнбоу),

2) с типичной продолжительностью рудообразования около 60 тыс. лет (ТАГ, Логачев, Зенит-Виктория),

3) с длительным рудообразованием — более 100 тыс. лет (Лост Сити, Краснов, Семёнов, Петербургское).

Сопоставление результатов датирования с предложенной выше классификацией геоморфологического положения и подробной морфологией рудоконтролирующих комплексов форм рельефа позволяет дополнить систематику положения рудопроявлений.

К 1-й группе относятся поля ГПС, которые расположены на наиболее молодой земной коре в пределах осевых поднятий рифтовой долины: линейной неовулканической зоны, осевого протрузионного горста или непосредственно на крупном вулкане центрального типа. В силу наиболее активного развития эндодинамических процессов в этой зоне максимальная длительность гидротермальных процессов не может превышать 25—30 тыс. лет. В пределах этой группы гидротермальные системы на базальтовом основании чрезвычайно молоды. Максимальные датировки среди них получены для поля Пью-де-Фолль и не превышают, по нашим данным, 19 тыс. лет.

Возраст ГПС самого древнего из 1-й группы поля Рейнбоу составляет ~23 тыс. лет [12] и сопоставим с возрастом ГПС поля Пью-де-Фолль, что даже при очевидных различиях в морфологии и геологическом строении можно объяснить подобием рудоконтролирующих структур по размерам и положению относительно нетрансформных смещений.

Ко 2-й группе относятся поля ГПС, расположенные на внутреннем склоне (в любой части его профиля от подножия до привершинной) или даже непосредственно на гребне первой гряды рифтовых гор. Они отличаются друг от друга по геологическому субстрату, стадийности гидротермальной активности и минералого-химическому составу рудной массы, но в силу сочетания геодинамических и гидрогеологических факторов ограничены единым пределом продолжительности рудообразования: по нашим данным, для всех ГПС этой группы он составляет примерно 60 тыс. лет [2].

Совпадение возрастов сульфидов при различном геоморфологическом и геологическом строении не может быть случайным. Можно предположить, что большинство гидротермальных полей, которые будут открыты в будущем на склонах рифтовой долины САХ, также будут иметь аналогичный возраст сульфидов, отражающий максимально возможную продолжительность функционирования гидротермальной системы в условиях медленного спрединга без влияния внешних привносящих факторов.

К 3-й группе относятся поля ГПС, которые наиболее значительно отличаются как друг от друга, так и от двух остальных групп. При этом все они выделяются длительной историей гидротермальной деятельности (не менее 100 тыс. лет). Площадь полей Краснов, Лост Сити и Петербургское невелика в силу малого размера рудоконтролирующих комплексов форм рельефа: перемычек и «аппендиксов». Наибольший интерес могут представлять объекты ГПС, которые формируются на пороогообразных ВОК. На изученном нами в

Таблица 2

Особенности геодинамического положения полей ГПС на эндогенном рельефе САХ

По генезису	Тектоногенные			Магматогенные		
	Внутри-транс-формные	Нетранс-формные внеосевые	Порогообразные ВОК	—	—	Переходные перемычки
По возрасту ≥ 100 тыс. лет			ВОК	—	—	—
≈ 60 тыс. лет				—	—	Привершинные первой грады
≤ 25 тыс. лет		Нетрансформные внутридолинные		Неоувулканическая зона	Крупные стратовулканы	Склоновые
По положению	Вне долины	Склоновые		Осевые поднятия на ложе		Околосклоновые

полевых и лабораторных условиях узле $13^{\circ}19'$ — $13^{\circ}30'$ находится не менее 6 малых полей ГПС (Семёнов-1—5, Ириновское), а максимальный возраст сульфидов поля Семёнов-4 составляет около 124 тыс. лет [11].

Повышенная сейсмическая активность вблизи таких структур, вероятно, создает наиболее благоприятные гидрогеологические условия для формирования построек «черных курильщиков» за счет изменения направлений движения придонных вод и возникновения многочисленных гъяров. Разбитый этими зияющими трещинами рудоконтролирующий ультраосновной массив в сочетании с «пробками» из старых и молодых базальтов может, на наш взгляд, играть для гидротермального флюида роль насоса. В то же время переменное влияние эндодинамических толчков и излияний лав определяет дискретный во времени характер гидротермальной активности. Для абсолютного большинства полей руды ГПС образуются за несколько этапов различной продолжительности [2]. Это опровергает ранние предположения [4] о преимущественной асейсмичности зон гидротермальной активности и о долговременной (до десятков тысяч лет) устойчивой циркуляции гидротермальных растворов.

Необходимо отметить, что не все полученные в СПбГУ датировки согласуются с предлагаемым разделением на три группы. Исключением, подтверждающим общее правило, является поле Ириновское, возраст которого уточняется [2]. Генетически рельеф данного участка близок к рельефу поднятия ВОК Семенов, меньшая продолжительность гидротермальной активности может быть связана со значительным распространением оползней на данном участке рифтовой долины.

На основании подробного анализа опубликованных батиметрических карт и результатов $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -датирования предварительная схематизация была су-

щественно дополнена, детализирована и упорядочена (табл. 2), что позволило, на наш взгляд, систематизировать имеющиеся материалы предшествующих исследований. Описываемое расположение полей ГПС заведомо названо в классификации геодинамическим положением, так как, имея эндодинамическую природу, рудоконтролирующие структуры напрямую зависят от глубинных процессов в тончайшей земной коре и прилегающей к ней верхней мантии.

В дальнейшем предполагается обогатить предложенную классификацию, подготовив цветной вариант таблицы, отражающий площадные особенности локализации полей ГПС, а также стадийность формирования ГПС.

Заключение. С геоморфологических позиций создана оригинальная классификация рудоконтролирующих комплексов форм рельефа Северо-Атлантического хребта как геодинамических структур, которые определяют развитие и длительность гидротермальной активности. Данные предлагаемого исследования показывают, что для формирования объектов ГПС важен не столько геологический состав пород или морфология определенного поднятия рудоконтролирующей структуры, сколько ее локализация на определенном участке рифтовой долины.

Принципиальное сходство между описанными комплексами форм рельефа с наложенной гидротермальной активностью продолжительностью до 100 тыс. лет и более заключается в барьерном воздействии на придонные воды. Именно контрастные положительные формы рельефа, вдающиеся в рифтовую долину либо в разлом САХ в крест простирания расщепляемой отрицательной формы рельефа при наличии гьяров, способствуют возникновению и длительному существованию гидротермальной активности. Для проверки этого тезиса необходимо не только детальное гидрогеологическое моделирование придонных водных потоков в условиях медленного спрединга, но и геохронологическое датирование всех известных полей ГПС вместе с подробным геоморфологическим анализом.

Как показывает обзор имеющихся материалов, интерес для поиска объектов ГПС представляют строго определенные формы рельефа. При геологоразведочных работах на ГПС на основе простейших геоморфологических построений возможно провести общий геодинамический анализ рельефа рифтовой долины сразу же по получении дистанционной основы. Как инструмент для облегчения подобных работ и предлагается созданная классификация (табл. 2).

Значительную помощь в подготовке статьи оказал профессор кафедры геоморфологии СПбГУ В. Ю. Кузнецов. Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 14-05-31301, мол_а.

Список литературы

- [1] Бельтенева В. Е., Неццетова А. В., Иванов В. Н., Шилов В. В., Рождественская И. И., Шагин А. А., Степанова Т. В., Андреева И. А., Семёнов Ю. П., Сергеев М. Б., Черкашев Г. А., Батуев Б. Н., Самоваров М. Л., Кротов А. Г., Марков В. Ф. Новое гидротермальное рудное поле в осевой зоне Срединно-Атлантического хребта // Докл. АН. 2007. Т. 397, № 1. С. 78—82.
- [2] Кузнецов В. Ю., Максимов Ф. Е. Методы четвертичной геохронометрии в палеогеографии и морской геологии. СПб.: Наука, 2012. 208 с.
- [3] Кузнецов В. Ю., Черкашев Г. А., Бельтенева В. Е., Леин А. Ю., Максимов Ф. Е., Шилов В. В., Степанова Т. В. $^{230}\text{Th}/\text{U}$ -датирование сульфидных руд океана: ме-

- тодические возможности, результаты измерений и перспективы использования // Докл. АН. 2007. Т. 416, № 5. С. 666—669.
- [4] Мазарович А. О., Пейве А. А., Добролюбова К. О., Разницын Ю. Н., Савельева Г. Н., Сколотнев С. Г., Соколов С. Ю., Турко Н. Н., Симонов В. А., Ковязин С. В. Перспективность района разлома Сьерра-Леоне (Центральная Атлантика) на открытие гидротермального поля // Геология и геофизика срединно-океанических хребтов. Российское отделение InterRidge (23—25 мая 2001 г.). С. 61.
- [5] Силантьев С. А., Аранович Л. Я., Бортников Н. С. Океанические плагиограниты: результат взаимодействия магматической и гидротермальной систем в медленноспрединговых срединно-океанических хребтах // Петрология. 2010. Т. 18, № 4. С. 387—401.
- [6] Bonatti E. Vertical tectonism in oceanic fracture zones // Earth Planet. Sci. Lett. 1978. Vol. 37. P. 369—379.
- [7] Cann J. R., Blackman D. K., Smith D. K., McAllister E., Janssen B., Mello S., Avgerinos E., Pascoe A. R., Escartin J. Corrugated slip surfaces formed at ridge-transform intersections on the Mid-Atlantic Ridge // Nature. 1997. Vol. 6614 (385). P. 329—332.
- [8] Cheadle M., Grimes C. To fault or not to fault // Nature Geoscience. 2010. Vol. 3. P. 454—456.
- [9] Cherkashov G., Poroshina I., Stepanova T., Ivanov V., Bel'tenev V., Lazareva L., Rozhdestvenskaya I., Samovarov M., Shilov V., Glasby G. P., Fouquet Y., Kuznetsov V. Seafloor massive sulfides from the northern equatorial Mid-Atlantic Ridge: new discoveries and perspectives // Marine Georesources and Geotechnology. 2010. Vol. 28 (3). P. 222—239.
- [10] Fouquet Y., Charlou J. L., Ondréas H. et al. Discovery and first submersible investigations on the Rainbow Hydrothermal Field on the MAR (36°14' N) // American Geophysical Union Fall Meeting (Eos Transactions). 1997. P. 832.
- [11] Kuznetsov V., Maksimov F., Zhelezov A., Cherkashov G., Bel'tenev V., Lazareva L. ²³⁰Th/U chronology of ore formation within the Semyenov hydrothermal district (13°31' N) at the Mid-Atlantic Ridge // Geochronometria. 2011. Vol. 38. P. 72—76.
- [12] Kuznetsov V., Cherkashev G., Lein A., Maksimov F., Arslanov Kh., Stepanova T., Chernov S., Tarasenko D. ²³⁰Th/U dating of massive sulfides from the Logatchev and Rainbow hydrothermal fields (Mid-Atlantic Ridge) // Geochronometria. 2006. Vol. 26. P. 51—56.
- [13] Lalou C., Reyss J. L., Bricchet E., Arnold M., Thompson G., Fouquet Y., Rona P. A. New age data for MAR hydrothermal sites: TAG and Snakepit chronology revisited // J. Geoph. Res. 1993. Vol. 98. P. 9705—9713.
- [14] Ludwig K. A., Shen C. C., Kelley D. S., Cheng H., Edwards R. L. U-Th systematics and ²³⁰Th ages of carbonate chimneys at the Lost City Hydrothermal Field // Geochimica et Cosmochimica Acta. 2011. Vol. 75 (7). P. 1869—1888.
- [15] Schouten H., Smith D. K., Cann J. R., Escartin J. Tectonic vs magmatic extension in the presence of core complexes at slow spreading ridges from a visualization of faulted seafloor topography // Geology. 2010. Vol. 38. P. 615—618.
- [16] Smith D. K., Escartín J., Schouten H., Cann J. R. Fault rotation and core complex formation: Significant processes in seafloor formation at slow-spreading mid-ocean ridges (Mid-Atlantic Ridge, 13—15° N) // Geochem. Geophys. Geosyst. 2008. Vol. 9 (3). P. 1—23.

Санкт-Петербург
a.zhelezov@spbu.ru
Санкт-Петербургский государственный университет,
ОАО «Севморгео»

Поступило в редакцию
7 мая 2013 г.