
**МЕТОДИКА
НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ**

УДК 551.4.012:551.4.08→551.462.62 (261.1)

**СПЕКТРАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ РЕЛЬЕФА ДЛЯ РЕШЕНИЯ
ПРОГНОЗНО-ПОИСКОВЫХ ЗАДАЧ НА ПРИМЕРЕ РИФТОВОЙ ЗОНЫ
СРЕДИННО-АТЛАНТИЧЕСКОГО ХРЕБТА**© 2020 г. И. С. Сергеев^{1,2,*}, И. В. Егоров², А. Б. Глебова¹¹*Санкт-Петербургский государственный университет, Институт наук о Земле,
Санкт-Петербург, Россия*²*ФГБУ “ВНИИОкеангеология”, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: igorsergeev.spb@gmail.com

Поступила в редакцию 20.03.2019 г.

После доработки 17.05.2019 г.

Принята к публикации 16.06.2020 г.

Приводятся результаты спектрального анализа (метод двумерного преобразования Фурье) глубоководного рельефа Срединно-Атлантического хребта. В связи со сложными условиями проведения исследований в Мировом океане значительная часть работ, в первую очередь на поисковой стадии, осуществляется с использованием дистанционных методов изучения рельефа, в том числе при помощи составления различного рода прогнозных карт, основанных на морфометрических характеристиках донной поверхности. Одним из вариантов прогнозных исследований стала разработанная авторами методика применения спектрального анализа глубоководного рельефа для прогноза локализации ГПС с использованием статистического критерия Стьюдента. В данном алгоритме за основу были взяты данные о рельефе десяти рудных полей ГПС в изучаемом регионе. Это позволило количественно оценить гармонические составляющие рельефа поверхности дна и определить их как поисковые признаки на месторождения сульфидов. В результате исследований был выделен ряд перспективных локальных участков возможного проявления гидротермального рудогенеза, имеющих определенную связь со структурно-геологическим строением. Создана прогнозная карта для поисков ГПС в южной части Российского разведочного района.

Ключевые слова: морфометрический анализ рельефа, преобразование Фурье, спектральный анализ рельефа, Срединно-Атлантический хребет, рифтовая зона, глубоководные полиметаллические сульфиды

DOI: 10.31857/S0435428120040094

ВВЕДЕНИЕ

Объективно сложные физико-географические и геолого-геоморфологические условия изучения глубоководных полиметаллических сульфидов (ГПС) требуют (особенно на начальном — поисковом — этапе) привлечения и широкого использования дистанционных методов прогноза для поисков сульфидных рудопроявлений. Актуальность прогнозных работ трудно переоценить, поскольку в связи с недавним принятием Международным органом по морскому дну правил разведки ГПС в настоящее время выполнение всех контрактов на Срединно-Атлантическом хребте (САХ) находится на поисковой стадии [1]. Естественным образом основными объектами прогнозных исследований являются донная поверхность и ее морфология, данные о которой формируются, в первую очередь, в результате многолучевой набортной (с разре-

пением до первых метров) и придонной (с разрешением до первых сантиметров) батиметрических съемок. Таким образом, существует возможность создания цифровых моделей донной поверхности любой детальности. В данном случае это является основой морфологического анализа и получения на его базе представлений о геолого-геоморфологической структуре дна для определения структурных закономерностей локализации гидротермальных сульфидных рудопроявлений и соответственно наиболее рационального планирования и проведения поисковых работ.

В условиях суши морфометрические методы изучения рельефа получили широкое распространение [2], разработано несколько десятков методов, основанных на количественном анализе точечных, линейных и площадных характеристик земной поверхности. В связи с существенным различием генетических процессов, от которых зависят формирование и развитие рельефа на суше и в океане, подавляющую часть известных методов (например, основанные на гидрологических процессах) невозможно применить при изучении субаквального рельефа. Некоторые известные методы (например, анализ расчлененности рельефа) можно адаптировать для изучения субаквального рельефа [3], но, как показывает практика, их недостаточно для выявления структурных закономерностей локализации ГПС. Таким образом, существует необходимость в разработке методов более детального анализа рельефа.

На протяжении ряда лет авторами разрабатывается метод спектрального анализа субаквального рельефа. На первом этапе рельеф исследовался путем анализа спектров выборочных профилей рельефа. При этом использовалось одномерное разложение Фурье (спектральный или гармонический анализ) по нескольким профилям для изучаемой площади. Выявленные ограничения, связанные с недостаточной информативностью, не позволяют применять одномерное разложение профиля рельефа в спектр для детального изучения морфологии донной поверхности [4].

Предыдущие работы получили развитие в виде нового вида морфометрического анализа — двумерного спектрального анализа рельефа, в конкретной геоморфологической обстановке рифтовой зоны Срединно-Атлантического хребта. Для этого потребовалось разработать алгоритм “распознавания с обучением”, при этом источником информации является рельеф дна, преобразованный в двумерный спектр гармонических составляющих или гармоник. С одной стороны, отличия в наборе гармонических составляющих от участка к участку позволяют различать изменчивость рельефа, а с другой стороны, преобладающее сходство хотя бы в нескольких гармониках позволяет утверждать о существовании общей причины, создавшей морфологический облик этих участков океанического дна. Все это дает возможность применять процедуру обучения — т.е. используя полученные данные о спектральных составляющих деформаций эталонного участка выявлять близкие участки в спектральных аспектах деформации как в ближайших окрестностях, так и за их пределами.

Заявленная тема подразумевает поиски того или иного типа рельефа в объеме прогнозно-поисковых задач. Тут следует учитывать, что глубоководные полиметаллические сульфиды представлены рудными полями, компактных размеров — несколько сотен метров, вытянутой формы [5, 6]. Возможны их проявления в виде построек “черных курильщиков”, в материалах исследований упоминаются близость вулканических аппаратов, трансформных разломов и приуроченность к таким крупным внутрикоровым образованиям — как внутренним океаническим комплексам. Исследуемый район ограничен координатами: с севера — $14^{\circ}49'$ с.ш.; с юга — $12^{\circ}52'$ с.ш.; с востока — $44^{\circ}49'$ з.д.; с запада — $45^{\circ}02'$ з.д. Для этого района имеются достаточно подробные данные о рельефе дна и при этом уже открыто несколько месторождений [6].

ТЕОРИЯ И МЕТОДЫ

Метод спектрального анализа был разработан математиком Ж. Фурье в XIX веке. Суть метода заключена в следующем: любой периодический сигнал можно разложить на ряд гармонических функций (ряд Фурье) таким образом, что при суммировании функций этого ряда получается исходный сигнал [7–9]. На основе этого имеется возможность анализировать составляющие сигнала, которые представлены набором гармонических функций – спектром. Спектр несет информацию о распределении энергии в сигнале между его периодическими составляющими. Применительно к рельефу можно оценить преобладающие деформации некоторого участка земной поверхности. Выделяемые периоды связаны с теми или иными процессами образования рельефа. В условиях океанического дна срединных хребтов эта связь определяется в большинстве случаев эндогенными процессами. Близкий к этому подход, заключающийся в спектральном разложении профилей рельефа для выявления корреляции с геофизическими полями Сибирской платформы, был применен в 90-х годах прошлого века исследователями В.П. Прониным и Д.В. Лопатиным [10].

Естественно спектральный анализ рельефа на современном этапе развития обработки информации и с учетом объемов требующихся вычислений немислимо выполнять без использования ГИС и сопутствующих приложений [11]. В практике обработки цифровых моделей рельефа (ЦМР) используется вариант дискретного преобразования Фурье [12].

Следует учитывать некоторые основные свойства дискретного спектрального преобразования. Первое важнейшее свойство спектрального преобразования состоит в том, что оно обратимо – из спектра возможно полностью восстановить исходный сигнал. Это значит, что информация из исходного участка не теряется в отличие, например, от дифференциальных преобразований при вычислении морфометрических параметров земной поверхности [2]. Поэтому в спектральном образе содержится ровно столько же информации, сколько и в исходном массиве дискретных значений участка поверхности.

Второе важное свойство: спектр – это набор волновых изменений, затрагивающих все рассматриваемое пространство и поэтому в спектре “отсутствует” информация о координатах конкретной точки внутри анализируемого участка. Для преодоления этого неудобства на больших площадях и только при избыточной информации о рельефе следует перед выполнением спектрального анализа разбивать изучаемую площадь на равномерно-расположенную сетку одинаковых площадок. Для каждой полученной палетки, состоящей из N^2 дискретных значений, выполняется спектральный анализ, при этом центр клетки будет выражать координату привязки конкретного участка Фурье-преобразования и значит локализовать определяемые спектральные свойства.

Третье важное свойство: спектральное преобразование распространяется на пространства любой размерности. Для геоморфологических целей это очень важно, так как дает возможность извлекать спектральную информацию непосредственно из двумерной поверхности (минуя профилирование), в частности из цифровых моделей рельефа адекватно представляющих земную поверхность. Двумерное дискретное преобразование Фурье, выполняемое одновременно по осям X и Y , позволяет выявить все возможные деформации не профиля, а поверхности в пределах заданной точности (дискретности) ЦМР – в данном исследовании оно равнялось 93 м.

ДВУМЕРНОЕ ПРЕОБРАЗОВАНИЕ ФУРЬЕ

При выполнении дискретного двумерного спектрального анализа необходимо учитывать, что согласно теореме Котельникова [12]: достаточное количество гармонических составляющих разложения $(N)^2/4 + N$, где N – дискретность исходной модели.

Таблица 1. Входные и выходные данные двумерного спектрального преобразования

Исходный массив гипсометрических значений, шаг отсчета равен разрешению ЦМР							Дискретное преобразование Фурье →	Массив амплитуд спектральных значений рельефа связанных с участком поверхности $N \times N$ гипсометрических значений						
отсчеты по оси X								отсчеты m -волн по оси X						
q/i	0	1	2	...	$N-1$			p/m	0	1	2	...	$N/2$	
0	Z_{00}	Z_{01}	Z_{02}	...	Z_{0N}	отсчеты p -волн по оси Y		0	F_{00}	F_{01}	F_{02}	...	$F_{0\ N/2}$	
1	Z_{10}	Z_{11}	Z_{12}	...	Z_{1N}			1	F_{10}	F_{11}	F_{12}	...	$F_{1\ N/2}$	
2	Z_{20}	Z_{21}	Z_{22}	...	Z_{2N}		2 <td>F_{20}</td> <td>F_{21}</td> <td>F_{22}</td> <td>...</td> <td>$F_{2\ N/2}$</td>	F_{20}	F_{21}	F_{22}	...	$F_{2\ N/2}$		
...	...	...	...	...	...		... <td>...</td> <td>...</td> <td>...</td> <td>...</td> <td>...</td>	...	...	...	...	...		
$N-1$	Z_{N0}	Z_{N1}	Z_{N2}	...	Z_{NN}		$N/2$	$F_{N/2\ 0}$	$F_{N/2\ 1}$	$F_{N/2\ 2}$	...	$F_{N/2\ N/2}$		

Аналитическое представление отсчетов (волновых чисел) для правильного выполнения двумерного преобразования показано в табл. 1.

Выражения для двумерного преобразования Фурье подробно рассмотрены в работе Дж.С. Дэвиса [8, с. 180–181: (5.98), (5.99)]. С первого взгляда, они громоздки, даже в общем представлении, однако в основе своей содержат только две операции сложения и умножения, применяемого в различных сочетаниях ко всем значениям пространственного массива. Базовый алгоритм расчета разработан с применением библиотек научного анализа “Numpy” программы Python 3.7.

Для примера покажем образы двумерных пространственных косинусоидальных волн, составляющих матрицу результата преобразования Фурье (табл. 1 — правая часть). Амплитуда волн будет равна условной единице, тогда гармоника F_{00} — это постоянная составляющая или среднее значение высоты для изучаемой площадки рельефа; F_{01} — ноль-первая гармоника: ноль — это указание на отсутствие гармонической волны в направлении Y — в меридиональном направлении, а в широтном направлении X наблюдается гармоническая волна и в пределах изучаемой площадки она состоит из одного периода; F_{02} — ноль-вторая гармоника: ноль — это указание на отсутствие гар-

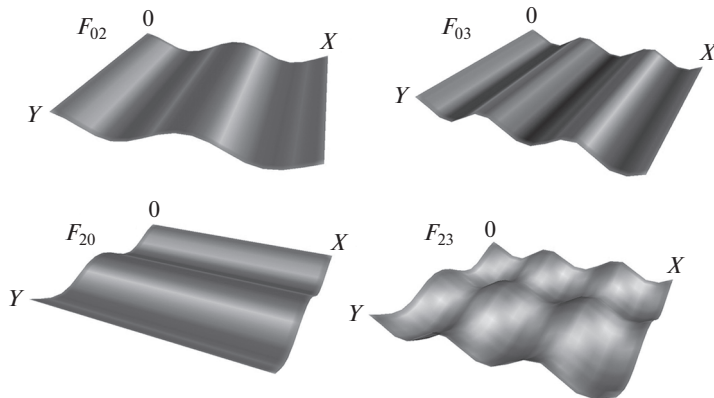


Рис. 1. Некоторые пространственные волны, ассоциируемые с соответствующими гармониками — результата преобразования Фурье. Главным свойством данных представлений является то, что любой рельеф земной поверхности в пределах заданной точности может быть составлен из подобных гармонических пространственных образований, при этом варьируются их амплитуды и фазовые смещения начала волн.

монической волны в направлении Y , а в направлении X наблюдается гармоническая волна и в пределах изучаемой площадки она состоит из двух периодов и т.д. — рис. 1. Соблюдая принцип этой нумерации, можно по номеру гармоники сразу же определить общий вид пространственной волны, учитывая, что номер гармоники означает еще и количество волн, укладываемых в исследуемое пространство по X и Y .

В результате спектрального преобразования одной площадки, содержащей 16×16 гипсометрических значений, получим значения амплитуд 80 гармоник и одно значение постоянной составляющей, которые характеризуют *все* присущие деформации данному участку и только одну пару координат центра исследуемой площадки — локализации выявленных спектральных особенностей рельефа. Таким образом, разложение Фурье применяется ко всему гипсометрическому массиву путем многократного повторения вычислений своеобразной спектральной палетки, сдвигая ее пошагово по всей изучаемой площади. Это дает возможность проанализировать всю исследуемую площадь (более 5000 км² — рис. 2) на предмет изучения пространственного распределения (усиления или ослабления) искомого спектрального сочетания.

В результате расчета спектров каждой палетки на данную территорию получен мультитипологональный слой, содержащий 2304 площадки, в каждой из которых записано 81 значение амплитуд гармонических составляющих.

ПРОВЕРКА ГИПОТЕЗЫ О (НЕ)ПРИНАДЛЕЖНОСТИ СРЕДНИХ ЗНАЧЕНИЙ ВЫБОРКИ АМПЛИТУД ГАРМОНИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ УЧАСТКОВ ИЗВЕСТНЫХ ГПС КО ВСЕМУ МАССИВУ ПОЛУЧЕННЫХ ЗНАЧЕНИЙ СПЕКТРА

Спектральное разложение представляет собой совокупность амплитуд гармонических деформаций. Таким образом, все возможные формы рельефа приведены в соответствие со стандартным набором гармонических деформаций. Уникальность рельефа каждой клетки поверхности выразится в амплитудных различиях стандартного набора гармоник — их всего 80 и 1 — постоянная составляющая. Такой формат представления позволяет осуществлять распознавание и поиск заданных комбинаций гармоник в массиве данных. На данном этапе воспользуемся статистическим, так называемым t -критерием для проверки гипотезы о непринадлежности клеток-участков рельефа, на которые попадают сульфидные поля по всему массиву клеток, принимая во внимание амплитудные значения спектра.

Сформулируем гипотезу, опираясь на следующие положения [7]:

1) имеется 10 образцовых клеток — участков с рельефом, так или иначе подвергшихся изменению в результате формирования сульфидов, параметр, их характеризующий — u_1 , математическое ожидание данной совокупности;

2) эти изменения заключены в повышенных (пониженных) амплитудах некоторых гармонических составляющих данных десять клеток по сравнению с остальными более 2000 клеток всего массива, являющих собой нормальное распределение с параметром u_0 — математическое ожидание всей совокупности;

3) нулевая гипотеза H_0 — массивы являются частью друг друга, отличий нет:

$$u_1 = u_0; \quad (1)$$

альтернатива H_1 — массивы различны:

$$u_1 \neq u_0. \quad (2)$$

На основе этого формулируем альтернативу для каждой гармоники: если значения расчетного t -критерия t_{li} с учетом среднего $\bar{X}$ амплитуд выборки ($n = 10$ — десять клеток, содержащие сульфидные поля) и среднего совокупности всего массива клеток (весь массив — более 2000 клеток, отождествляется с генеральной совокупностью),

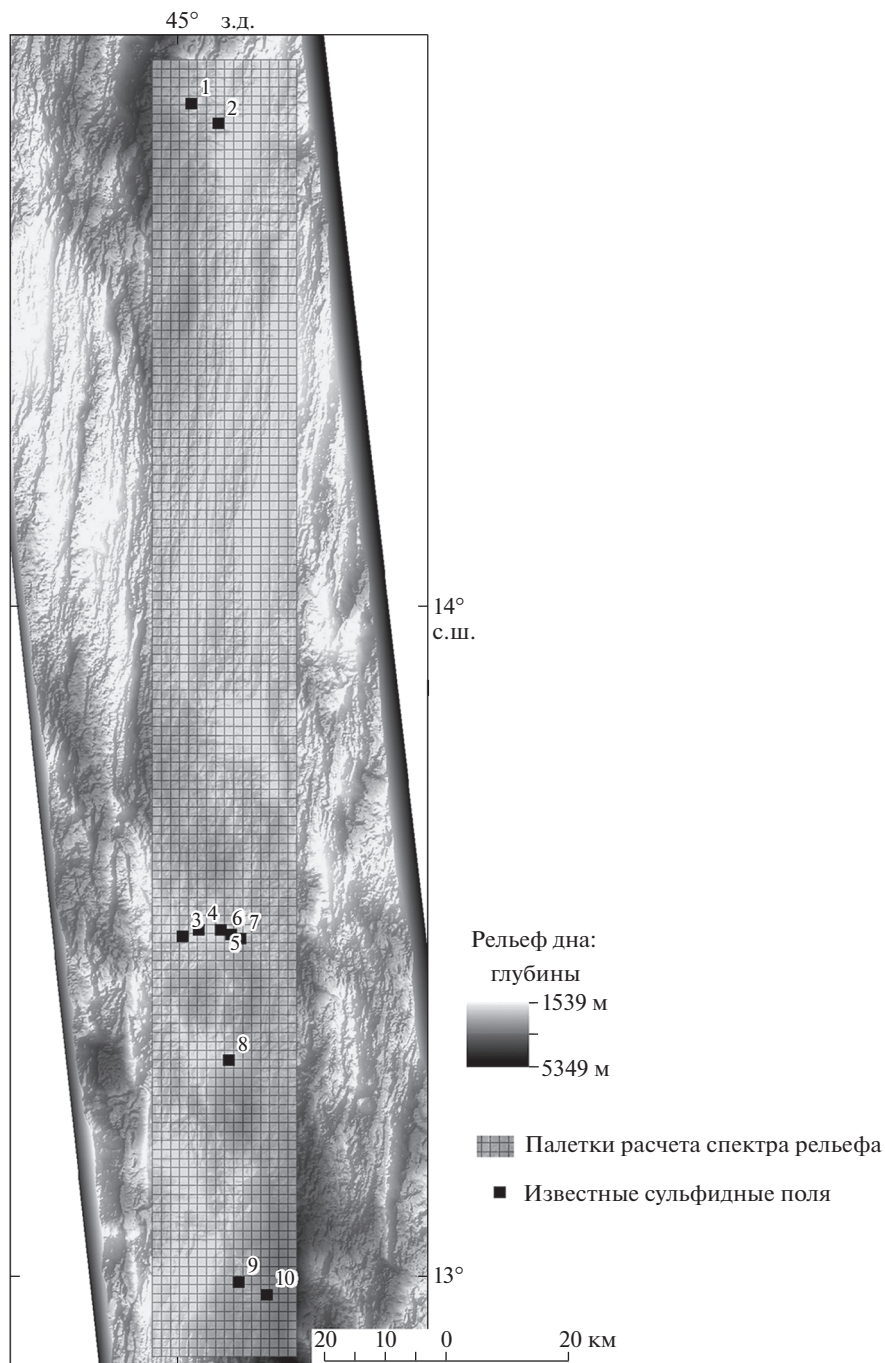


Рис. 2. Разбивка поверхности изучаемого района Срединно-Атлантического хребта на палетки спектрального анализа, к некоторым из них (под условными номерами) приурочены известные месторождения глубоководных полиметаллических сульфидов [5, 6].

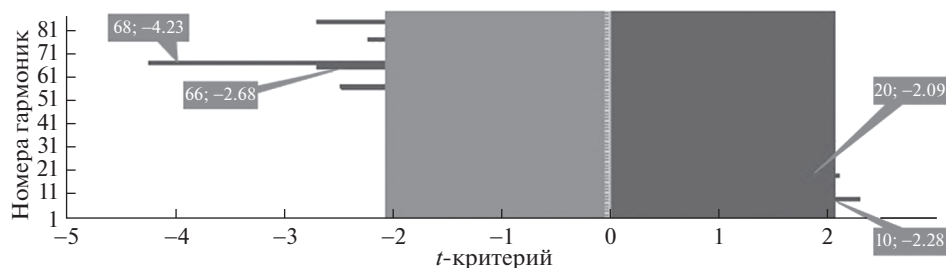


Рис. 3. Сравнение расчетного t -критерия амплитуд каждой гармоники и распределения Стьюдента при 9 степенях свободы и заданном уровне значимости 5% (сплошная прямоугольная заливка).

больше распределения Стьюдента при заданной вероятности $a/2$ и $n - 1$ степенях свободы для положительного правого “хвоста” распределения, то делается вывод о не-принадлежности данной гармоники ко всему массиву амплитуд, т.е. подтверждение о ее особенностях и возможности использования как поискового признака. Однако распределение Стьюдента симметрично относительно нуля и t -критерий может иметь и отрицательные значения. Это позволяет расширить гипотезу: если значения расчетного t -критерия t_i с учетом среднего $\bar{X}$ амплитуд выборки ($n = 10$ – десять клеток, содержащие сульфидные поля) и среднего совокупности всего массива клеток, меньше распределения Стьюдента при заданной вероятности $a/2$ и $n - 1$ степенях свободы для левого отрицательного “хвоста” распределения, делается вывод о непринадлежности данной гармоники ко всему массиву амплитуд и указывает на ее *обязательные* близкие к нулю амплитуды в случае применения как поискового признака уже определенной выше гармоники положительного значения t -критерия.

Расчет t -критерия выполняется по выражению [8]:

$$t_j = (X_j - U_{0j}) / (s_{xj} \sqrt{n}), \quad (3)$$

где X_j – среднее амплитуд выборки массива j -й гармоники, U_{0j} – среднее амплитуд всего массива, s_{xj} – дисперсия выборки, n – количество (их 10) элементов (известных сульфидных полей) в выборке.

Значение распределения Стьюдента при $n - 1$ степенях свободы, с которым будет сравниваться расчетный t -критерий, находится по соответствующим таблицам или по функции в статистическом блоке Excel.

Проводим подобный расчет для *всех* гармоник в среде электронных таблиц Excel.

После выполнения подобных расчетов строится график расчетных t -критериев, также на графике указываются значения левого – отрицательного и правого – положительного “хвостов” (рис. 3).

На графике наглядно показаны значения 5% уровня значимости – выше и ниже значений правого и левого “хвостов” распределения Стьюдента. Для поискового критерия определены 10 и 20, так называемые “положительные”, гармоники и весьма большое количество “антигармоник” – с отрицательным расчетным t -критерием выборки амплитуд меньшим критического значения левого “хвоста” распределения Стьюдента. Для поискового критерия из них следует выбрать гармоники с наименьшими отрицательными значениями, т.е. под номерами 66 и 68.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Выявленные четыре значимые гармонические составляющие, сопутствующие сульфидным полям, следует соотнести друг с другом в части пространственного положе-

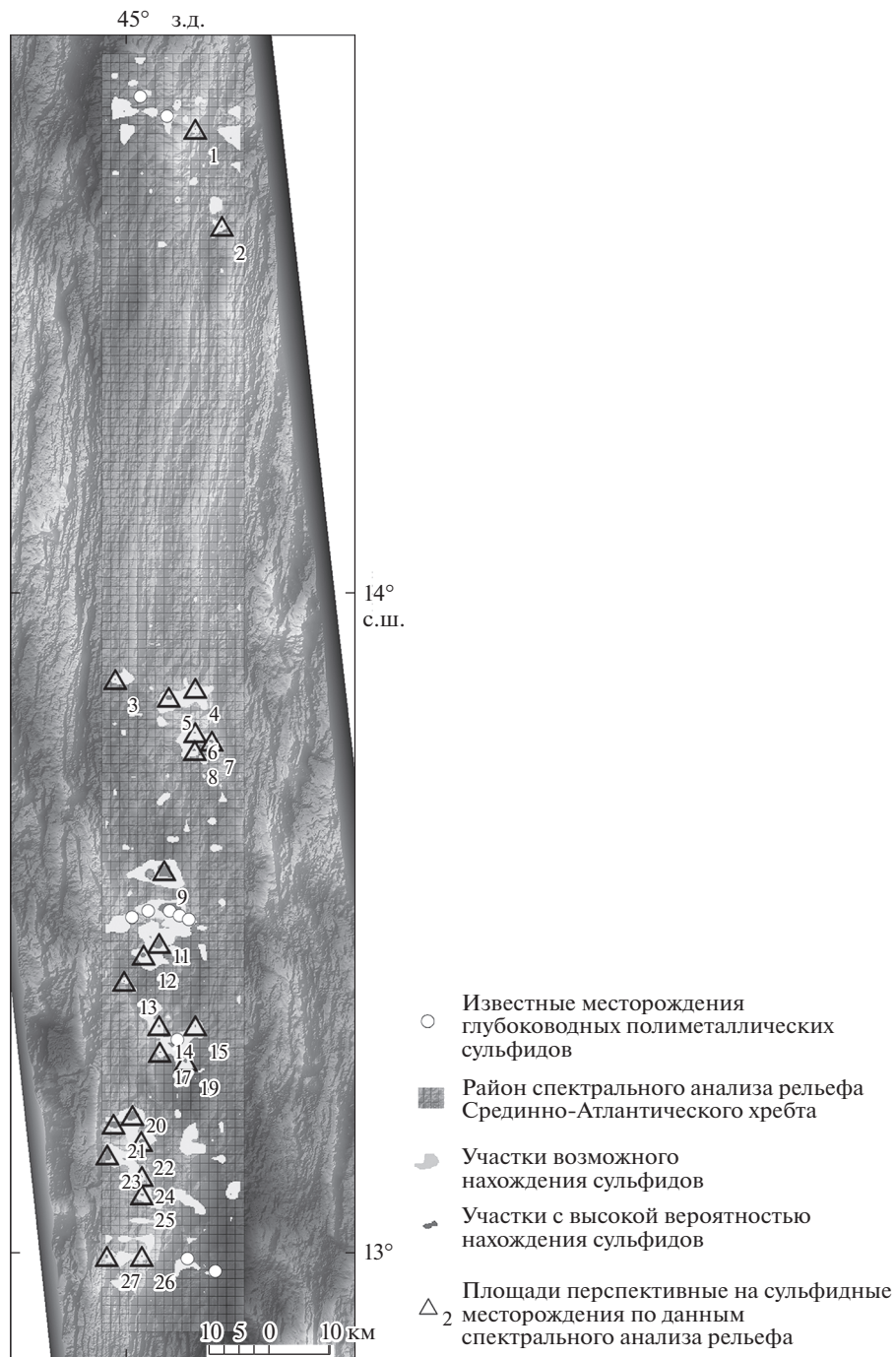


Рис. 4. Прогнозная карта, полученная на основе проведенного спектрального анализа рельефа дна исследуемого района Срединно-Атлантического хребта.

ния, применив статистический анализ. Для этого требуется построить соответствующие цифровые модели пространственного распределения в терминах вероятности и путем их совмещения построить прогнозную карту нахождения сульфидных полей на исследуемый район. Для этого выполним последовательно нормализацию и стандартизацию пространственных массивов амплитудных значений выявленных поисковых гармоник в приложении ArcGIS [11]. После данной подготовки растров амплитуд 10, 20, 66 и 68 гармоник к вычислению вероятности пространственного положения сульфидных полей в той или иной точке района необходимо инвертировать полученные растры гармоник под номерами 66 и 68. Это необходимо сделать для дальнейшего вычисления совместной вероятности по всем четырем признакам. Следующим этапом явится исключение отрицательных значений стандартных отклонений для каждого массива (представленного растром) или точнее – заменим их на ноль. Тогда результирующее вероятностное поле $P(i)$ находится по выражению:

$$P(i) = \sqrt{\frac{(S_{10i}S_{66i} + S_{10i}S_{68i} + S_{20i}S_{66i} + S_{20i}S_{68i})}{4}}, \quad (4)$$

где S_{10i} , S_{20i} – нормализованные и стандартизированные положительные i значения массивов амплитуд 10 и 20 гармоник соответственно, а S_{66i} и S_{68i} – нормализованные и стандартизированные отрицательные i значения амплитуд 66 и 68 гармоник. Наличие настраиваемой классификации отображения полученного растра прогноза в ArcGIS весьма удобно, так как по гистограмме можно задавать границы оконтуривания площадей в терминах вероятности. Например, говорить о высокой вероятности совместного нахождения поисковых признаков можно в случае, когда значение амплитуд результирующего растра достигает более 1.66 значений стандартного отклонения, а площади, на которые, возможно, следует обратить внимание, имеют значения стандартного отклонения 0.66–1.6.

Таким образом, на участке Срединно-Атлантического хребта площадью более 5000 км², подвергнутого анализу по вышеприведенной методике, наблюдается хорошее совпадение прогноза с известными месторождениями и при этом выявляется более двух десятков новых высоковероятных площадей на сульфиды (рис. 4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Правила поиска и разведки полиметаллических конкреций в Районе [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://ran-s3.s3.amazonaws.com/isa.org.jm/s3fs-public/documents/RU/Regs/MiningCode.pdf>. Дата обращения: 10.12.2018.
2. Симонов Ю.Г. Объяснительная морфометрия рельефа. М.: ГЕОС, 1999. 251 с.
3. Сергеев И.С., Егоров И.В. Геоинформационный анализ в морских геоморфологических исследованиях (на примере Беломорского шельфа) // Изв. РГО. 2014. Т. 146. № 5. С. 28–38.
4. Харченко С.В., Казаков С.Г. Спектральные характеристики рельефа суши в задачах его автоматизированной классификации (на примере Южной Америки) // Вестник Моск. гос. обл. ун-та. Естественные науки. 2018. № 4. С. 39–49.
5. Сергеев И.С. Фрактальная структура земной поверхности и ее связь со строением земной коры (на примере северо-запада Архангельской области). Дис. ... канд. геогр. наук. СПб.: СПбГУ, 2016. 118 с.
6. Перцев А.Н., Бортников Н.С., Власов Е.А., Бельтнев В.Е., Добрецова И.Г., Агеева О.А. Современные колчеданные залежи рудоносного района Семенов (Срединно-Атлантический хребет, 13°31' с. ш.): характеристика ассоциирующих пород внутреннего океанического комплекса и их гидротермальных изменений // Геология рудных месторождений. 2012. Т. 54. № 5. С. 400–415.
7. Углов Б.Д., Комарова О.И. Геофизические методы при поисках и разведке месторождений глубоководных сульфидных руд Мирового океана. М.: ЦНИГРИ, 2012. 69 с.

8. Дэвис Дж.С. Статистический анализ данных в геологии. Кн. 1. М.: Недра, 1990. 319 с.
9. Дэвис Дж.С. Статистический анализ данных в геологии. Кн. 2. М.: Недра, 1990. 427 с.
10. Пронин В.П., Лопатин Д.В. Корреляция геофизических полей. М.: ИЗМИ РАН, 1991. 256 с.
11. ArcGIS Resource Center [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://resources.arcgis.com>. Дата обращения: 04.04.2017.
12. Сергиенко А.Б. Цифровая обработка сигналов. СПб: БХВ-Петербург, 2002. 608 с.

Spectral analysis of ocean bottom for geological prospecting (on the example of the rift zone of the Mid-Atlantic ridge)

I. S. Sergeev^{a,b,#}, I. V. Egorov^b, and A. B. Glebova^a

^aSPSU, Institute of Earth Sciences, St. Petersburg, Russia

^bVNIIOkeangeologia, St. Petersburg, Russia

[#]E-mail: igorsergeev.spb@gmail.com

The article presents the results of applying spectral analysis (the method of two-dimensional Fourier transformation) for the study of the deep-water relief of the Mid-Atlantic Ridge (MAR). Due to the difficult research conditions in the World Ocean, a significant part of the work, primarily at the exploratory stage, is carried out using remote sensing techniques, including using a variety of prognostic maps based on morphometric characteristics of the bottom surface. The new method applying spectral analysis of the deep-sea relief to predict the localization of the sulphides using the Student's *t*-test, was developed by authors. Using the bathymetric data of ten ore fields in the studied region, we identified the criteria for the spectral deformation components of the bottom surface as prospecting signs for sulphide deposits. As a result of the research, a number of perspective local areas connected to geologic structures, where hydrothermal ore formation is possible, were identified. A prognostic map has been created for prospecting deep-sea polymetallic sulphides in the southern part of the Russian exploration area.

Keywords: morphometric analysis of the relief, Fourier transformation, spectral analysis of the relief, Mid-Atlantic Ridge, rift zone, deep-water polymetallic sulphides

REFERENCES

1. *Pravila poiska i razvedki polimetallicheskikh konkracij v Rajone* [Electronic source]. Access regime: <https://ran-s3.s3.amazonaws.com/isa.org.jm/s3fs-public/documents/RU/Regs/Mining-Code.pdf>. Access date: 10.12.2018.
2. Simonov Y.G. *Ob "yasnitel'naya morfometriya rel'efa* (Explanatory Morphometry of a Landform). М.: GEOS (Publ.), 1999. 251 s.
3. Sergeev I.S. and Egorov I.V. *Geoinformatsionnyi analiz v morskikh geomorfologicheskikh issledovaniyakh (na primere Belomorskogo shel'fa)* Geoinformational Analysis in Marine Geomorphological Studies (Exemplified by the White Sea Shelf). *Izv. RGO (Regional Research of Russia)*. 2014. T. 146. No. 5. S. 28–38. (in Russ.)
4. Kharchenko S.V. and Kazakov S.G. *Spektral'nye kharakteristiki rel'efa sushi v zadachakh ego avtomatizirovannoi klassifikatsii (na primere Yuzhnoi Ameriki)* (Spectral Characteristics of the Land Relief in Its Automated Classification Tasks (Exemplified by South America). *Vestnik Mosk. gos. obl. un-ta. Estestvennye nauki*. 2018. No. 4. S. 39–49. (in Russ.)
5. Sergeev I.S. *Fraktal'naya struktura zemnoi poverkhnosti i ee svyaz' so stroeniem zemnoi kory (na primere severo-zapada Arkhangel'skoi oblasti)* (The Fractal Structure of the Terrestrial Surface and its relationship with the structure of the earth's crust (on the Example of the North-West of the Arkhangelsk Region). SPb.: SPbGU (Publ.), 2016. 118 s.
6. Pertsev A.N., Bortnikov N.S., Vlasov E.A., Beltenev V.E., Dobretsova I.G., and Ageeva O.A. *Sovremennye kolchedannye zalezhi rudonosnogo raiona Semenov (Sredinno-Atlanticheskii khrebet, 13°31' s.sh.): kharakteristika assotsiiiruyushchikh porod vnutrennego okeanicheskogo kompleksa i ikh gidrotermal'nykh izmenenii* (Modern Pyrite Deposits of the Ore-bearing Area of Semenov (Mid-Atlantic Ridge, 13°31' N): the Characteristic of Associated Rocks of the Internal Oceanic Complex

- and Their Hydrothermal Changes). *Geologiya rudnykh mestorozhdenii*. 2012. T. 54. No. 5. S. 400–415. (in Russ.)
7. Uglov B.D. and Komarova O.I. *Geofizicheskie metody pri poiskakh i razvedke mestorozhdenii glubokovodnykh sul'fidnykh rud Mirovogo okeana* (Geophysical Methods for Prospecting and Exploration of Deep-sea Deposits of Sulphide Ores in the World Ocean). M.: TSNIGRI (Publ.), 2012. 69 s.
 8. Davis J.S. *Statisticheskii analiz dannykh v geologii*. (Statistical Analysis of Data in Geology). Kn. 1. M.: Nedra (Publ.), 1990. 319 s.
 9. Davis J.S. *Statisticheskii analiz dannykh v geologii*. (Statistical Analysis of Data in Geology). Kn. 2. M.: Nedra (Publ.), 1990. 427 s.
 10. Pronin V.P. and Lopatin D.V. *Korrelyatsiya geofizicheskikh polei* (Correlation of Geophysical Fields). M.: IZMI RAN (Publ.), 1991. 256 s.
 11. *ArcGIS Resource Center* [Electronic source]. Access regime: <http://resources.arcgis.com>. Access date: 04.04.2017.
 12. Sergienko A.B. *Tsifrovaya obrabotka signalov*. (Digital Signal Processing). SPb: BKhV-Peterburg (Publ.), 2002. 608 s.