

УДК 551.462:004.9(265)

© Е.И. Чесалова

Е.И. Чесалова

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ГИС-ТЕХНОЛОГИЙ ДЛЯ КЛАССИФИКАЦИИ ПОДВОДНЫХ ФОРМ РЕЛЬЕФА И ОЦЕНКИ ИХ РУДНОЙ ПРОДУКТИВНОСТИ (НА ПРИМЕРЕ МАГЕЛЛАНОВЫХ ПОДВОДНЫХ ГОР, ТИХИЙ ОКЕАН)

Введение

В настоящее время на дне Мирового океана насчитывается более 200 тысяч вулканических подводных гор, атоллов, островов. Изучение рельефа подводных гор дает важные результаты для понимания процессов магматизма океанов, а также для исследования распространения рудных образований океана.

Наиболее полный на настоящее время каталог подводных гор, созданный на основе анализа альтиметрических данных, содержит информацию примерно о 150 000 подводных гор [1]. К сожалению, в данной базе содержится информация только о координатах вершины, высоте и радиусе горы. Но нет картографического, векторного представления полигона основания горы и нет, соответственно, и площади основания, объема горы и других морфометрических данных. Другой наиболее популярный каталог Seamount Biogeoscience Network (SBN) (<http://earthref.org/SBN>) содержит только растровые изображения гор, что снижает возможность математической обработки, и в его описательной части морфометрические данные представлены только для небольшого количества гор. Более полноценное описание рельефа подводных гор повысило бы ценность каталога для изучения пространственно-временных особенностей проявления подводного вулканизма.

Для решения задачи были взяты батиметрические данные GEBCO_08 (<http://www.gebco.net>) с разрешением 30 секунд и разработан алгоритм выделения собственно вулканической постройки – ее контура, для которого использовались инструменты, предоставляемые ГИС (ArcGIS 10.1 Spatial Analyst). В результате каталог создается автоматически, и из рассмотрения не исключается ни одно горное сооружение, представленное на батиметрической карте. Для опробования алгоритма была выбрана северо-западная часть Тихого океана.

Методика создания каталога

Алгоритм заключается в расчете градиентов (углов наклона) поверхности дна океана. Для определения контура горы выделялись области положительного градиента, превышающего 5° , в пределах замкнутых изолиний (гора – замкнутая форма рельефа) (рис. 1). Предварительно, для того чтобы убрать крупные формы рельефа (низкочастотную составляющую), проводилось осреднение в скользящем окне. Ширина Тихоокеанских хребтов подводных гор и поднятий колеблется от 200 км до 1000 км (измерения проводились по той же батиметрической карте), поэтому размер скользящего окна был принят 200×200 км. Из анализа фоновая составляющая вычиталась.

Фоновая составляющая в дальнейшем использовалась для выделения крупных структур (поднятия,

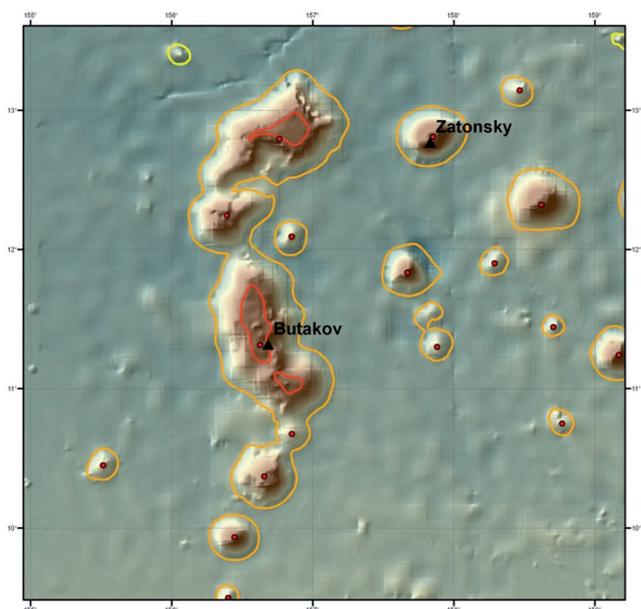


Рис. 1. Выделенные контуры подводных гор: желтые линии – основания, красные линии – плоские вершины, черные точки – вершины

впадины). В каталог для каждой горы вносилась принадлежность к определенной структуре (рис. 2).

После выделения контура подводной горы, все также используя встроенные инструменты Spatial Analyst ArcGIS 10.1, на основе батиметрической карты и ее различных трансформаций (карт градиента, криватуры, карты особых точек) рассчитывались координаты вершины, глубины нахождения основания и вершины, относительная высота постройки, азимут простираения, степень изометричности, наличие террас, степень изрезанности, площадь, объем и т.д. Данные параметры заносились в атрибутивную таблицу шейп-файла.

На основе разработанного алгоритма в изученном регионе было выделено около 2000 подводных

гор. Для сравнения каталог [1] содержит на данную территорию более 6000 гор. Сравнение каталогов представлено на рис. 3.

Гораздо меньшее количество выделенных по предложенной методике гор связано с тем, что выделяется единая многовершинная структура, объединенная общим цоколем, подчеркивая тем самым, возможно, единый магматический очаг образования. А количество вершин, осложняющих постройку, приводится в каталоге. В то же время видно, что не все, даже крупные горы, представлены в каталоге [1].

Такое количество выделенных гор достаточно для проведения статистического анализа. Важной характеристикой объектов, помогающей понять механизм их образования, является функция

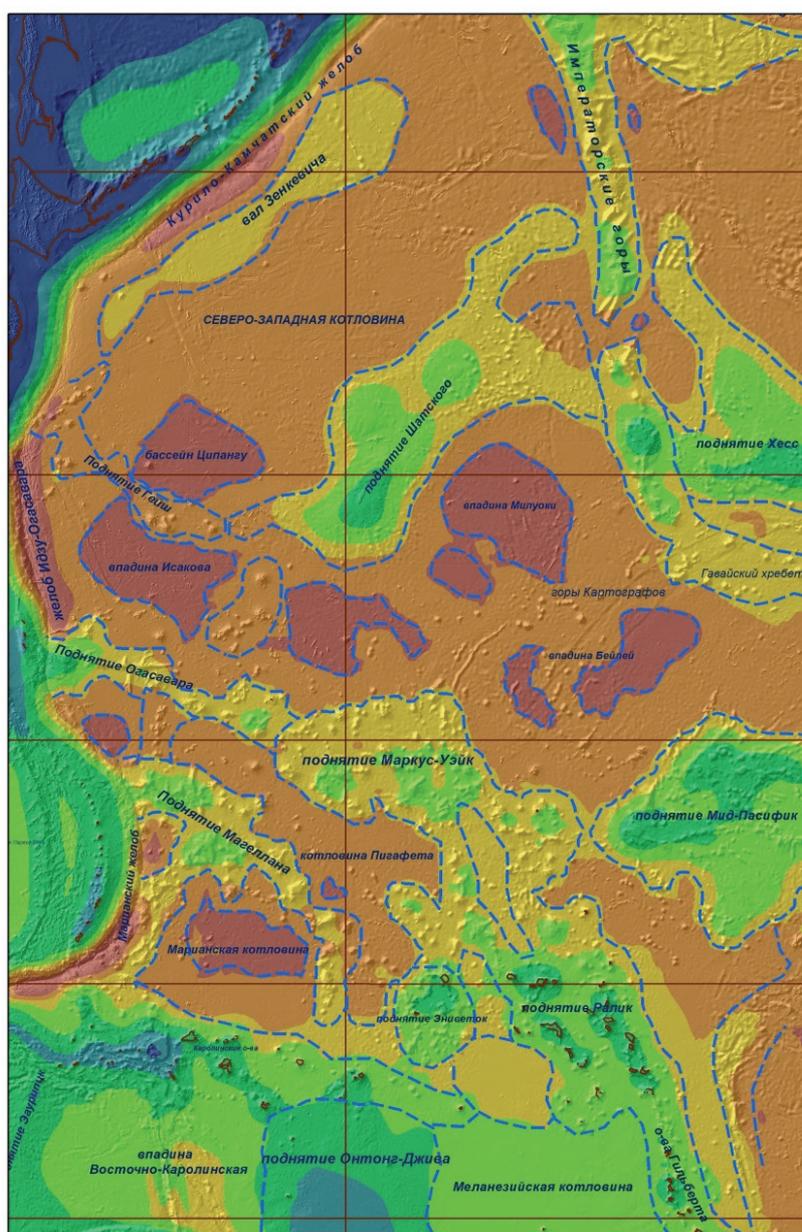


Рис. 2. Фоновая составляющая батиметрических данных. Выделенные структурные элементы

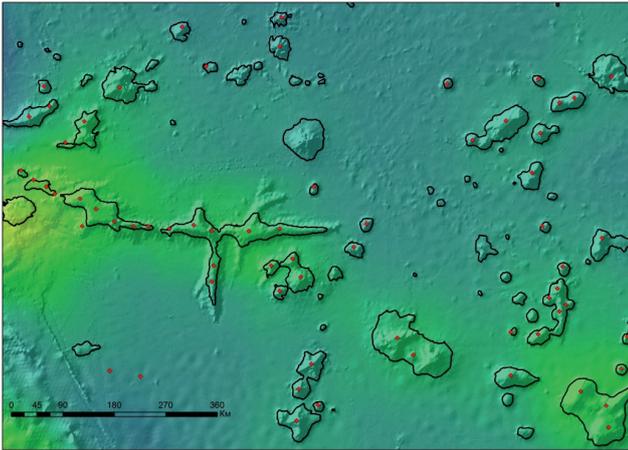


Рис. 3. Сравнение каталогов. Красные точки – каталог Wessel; черные линии – контуры выделенных гор по предложенной методике

распределения числа объектов в зависимости от их размеров. Исследуя вид распределения можно получить косвенные данные о внутренней взаимосвязи параметров, а следовательно, и выйти на механизм образования подводных гор.

Гистограмма распределения числа гор в зависимости от площади основания горы визуально распадается на несколько сегментов (рис. 4).

Для уточнения границ сегментов был проведен анализ группирования (набор инструментов пространственной статистики ArcGIS), который заключается в выделении наиболее отличающихся между собой (по величине заданного параметра) частей выборки при наименьшей дисперсии параметра внутри группы. Было выделено 5 областей (на рисунке они представлены разными цветами). Возможно,

граничные размеры этих групп отражают некоторые характерные черты процесса, ответственного за формирование подводных гор. В частности, причина может заключаться в разной тепловой мощности или разных характерных глубинах, порождающих вулканизм магматических очагов.

С физической точки зрения, как аналог распределения величины энергии порождающего подводные горы процесса, более интересным параметром является не площадь основания горы, а объем горы.

Для расчета объема горы аппроксимировались правильными конусами, с кругом в основании, равным измеренной площади выделенного полигона, и углом наклона боковой грани 28° , что соответствует максимально устойчивому углу склона. Полученное в этих условиях логарифмическое распределение величин объемов морских гор приведено на рис. 5.

На рис. 5 так же, как ранее на рис. 4, видна сегментация функции распределения. Сегменты могут быть описаны степенным законом. Отметим, что метод, когда истинный закон распределения заменяется несколькими простыми степенными законами, часто используется и при описании графика повторяемости землетрясений, который описывается законом Гутенберга–Рихтера ($\ln N = bA$, где N – число событий, A – величина параметра события, а b степенной коэффициент).

С точки зрения этого закона эта сегментация может отражать независимость процессов образования гор в выделенных группах.

При пересчете объема на эквивалентный радиус основания горы, получаем значения радиусов точек границ диапазонов сегментации (границы обозначены на рисунке зелеными полосками) – 10,

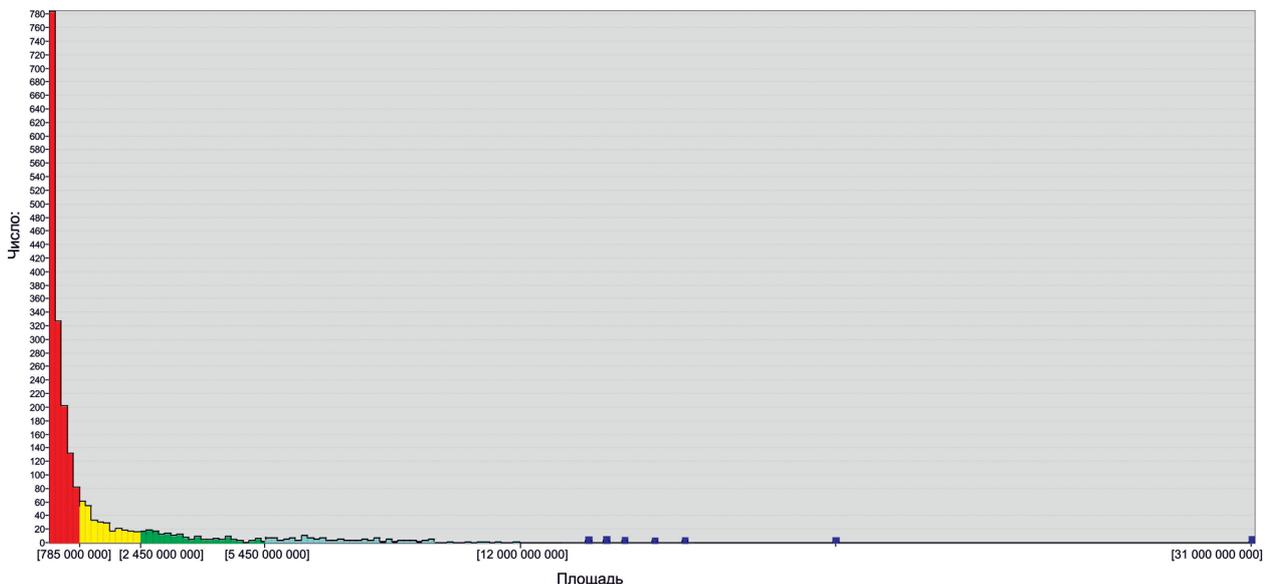


Рис. 4. Гистограмма распределения числа гор в зависимости от их площади (значения представлены в метрах)

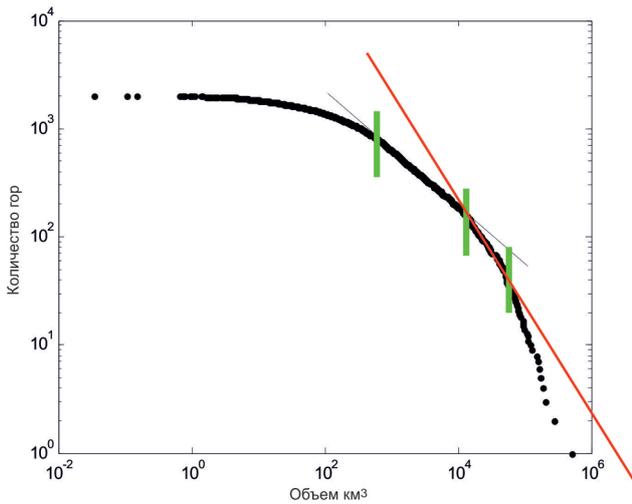


Рис. 5. Функция распределения числа гор в зависимости от их объема

30 и 50-60 км. На рис. 5 проведена красная прямая с единичным наклоном. Она касается эмпирического распределения примерно в области гор размером 30 000 км³. Для правильного конуса это соответствует радиусу основания горы около 40 км.

Аналогично тому, как это имеет место в случае анализа графика повторяемости числа землетрясений [2], можно показать, что именно с горами такого размера будет связан максимум гистограммы объема гор в зависимости от их размера.

Соответственно (на основе упрощенной аналогии: объем вулканической горы – энергия извержения), можно предположить, что именно с горами такого характерного размера связан максимум объемов изверженного вещества и энергии извержений.

На основе основных морфометрических признаков (площадь, высота, степень вытянутости) была проведена классификация подводных гор. По площади и высоте были выделены гигантские, большие, средние, малые и маленькие.

1. К первой группе относятся уникальные горные сооружения. Среди них можно выделить

две подгруппы. Это ряд сложных, объединенных на одном цоколе плосковершинных гор, т.е. гайотов (горы Императорской дуги, поднятия Гильберта, Маршалловых островов), и гигантские щитовые вулканы сводовых поднятий (поднятия Шатского, Мид-Пасифик, Хесса). Гайоты отличаются от щитовых вулканов гораздо большей высотой. Для гайотов характерны высоты 2000-4000 м, для щитовых вулканов – около 1000 м.

2. Выделенная группа больших гор также разделяется на две подгруппы – высокие и невысокие (рис. 6). Высокие горы – это долго развивающиеся постройки, сложные сооружения, с несколькими вершинами на общем цоколе гайоты (Магеллановы горы, поднятие Маркус-Нейкер, Каролинские острова) – на графике зеленые, оранжевые, красные квадраты. Большие и невысокие – это щитовые вулканы, либо сооружения, расположенные на валах перед глубоководными желобами, а также подводные горы, связанные с разломами – синие и фиолетовые квадраты. Приразломные отличаются от прочих большой степенью вытянутости. Из графика также видно, что для группы гор большей площадью (гигантские) характерны меньшие высоты.

3. Средние, высокие сооружения – это по большей части сооружения идеальных форм – изометричные, слабоизрезанные, либо одиночные, либо составляющие цепи. Есть и гайоты, но, в отличие от гор с большими размерами, они не образуют сложных структур с общим основанием (гайоты поднятий Гейш, Мид-Пасифик и др.). Средние, плоские горы – это горы на поднятиях с неотектоникой, либо изометричные, либо вытянутые вдоль неоразломов. Т.е. средние горы по большей части связаны с современной тектоникой.

4. Малые, высокие – это изометричные, либо идеальной формы, либо изрезанные. В этой группе нет гор вытянутых форм.

Выделенная группа средних и малых гор часто приурочена к системам активных разломов.

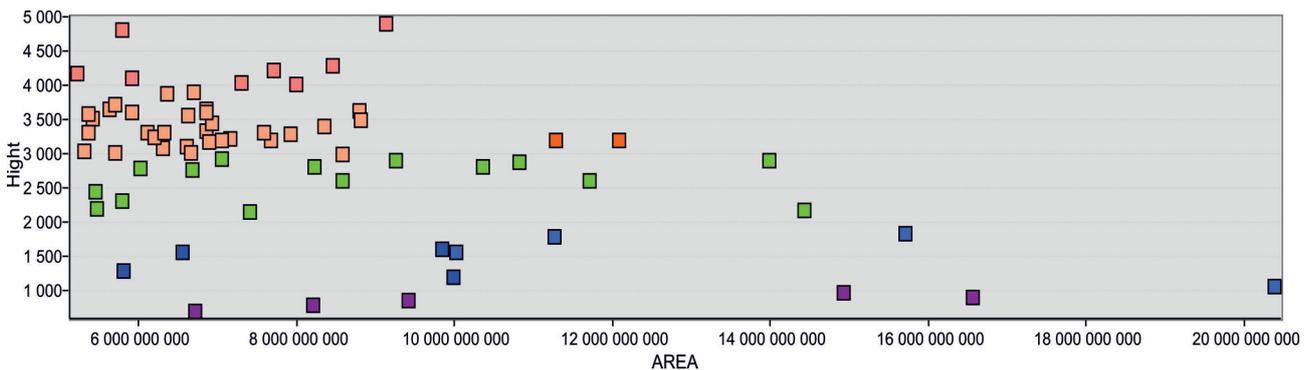


Рис. 6. Большие и гигантские горы. Распределение по площади и высоте

К приразломным относятся небольшие, правильной либо вытянутой формы горы, расположенные цепочкой, с небольшими расстояниями между собой. Оценка расстояний между центрами вулканизма никогда не оценивалась ранее. Однако этот параметр может отражать определенные природные закономерности формирования подводных гор. Расчет параметра: расстояние до близлежащего соседа измерялось как расстояние между геометрическими центрами подводных гор, которые попадают в одну классификационную группу (горы брались из одной классификационной группы по площади).

Мы предполагаем, что большие расстояния между горами, расположенными вдоль дуг, могут реализоваться, если гора возникла на выходе поднимающегося потока горячего мантийного вещества. Продолжение роста подводного вулкана за счет подпитки от мантийного плюмового источника будет сохраняться до тех пор, пока магматический канал не будет разорван. Разрыв канала определяется возможностью сохранения трассы подъема магм при изгибании и усложнении траектории канала при удалении горы от области плюма. В этом случае в ближайшей окрестности горы шансы для образования новой горы довольно малы, несмотря на высокую активность вулканического процесса. Формирование новой вулканической горы происходит уже при заметном удалении ранее образованной горы от области развития плюма.

Механизм перескока центра вулканизма в другое место и инициация образования новой подводной горы, по-видимому, определяются механизмами дренирования мантийных расплавов в определенную точку вулканической активности. В окрестностях этой точки реализуется сценарий «отталкивания», невозможность сформировать новый канал дренирования расплавов.

Напротив, при формировании вулканической активности трещинного типа область дренирования формируется сразу, на большом протяжении, в виде линейного разлома, сформированного при разрядке внутренней энергии активной геосреды, и тогда сценарий «отталкивания» не реализуется.

На рис. 7 показан район Магеллановых гор. Видно, что крупные гайоты расположены на больших расстояниях друг от друга, а цепочки небольших гор, по-видимому, трассируют разломы (черные пунктирные линии).

Таким образом, по имеющимся геометрическим характеристикам можно провести ранжирование, которое будет отражать процессы формирования подводных гор.

Созданная картографическая база подводных гор опубликована в виде веб-сервиса и представлена

на геопортале ArcGIS Online в качестве актуализированной для пользователя веб-карты, что позволяет использовать его не только для просмотра через веб-браузер, но и в настольных приложениях.

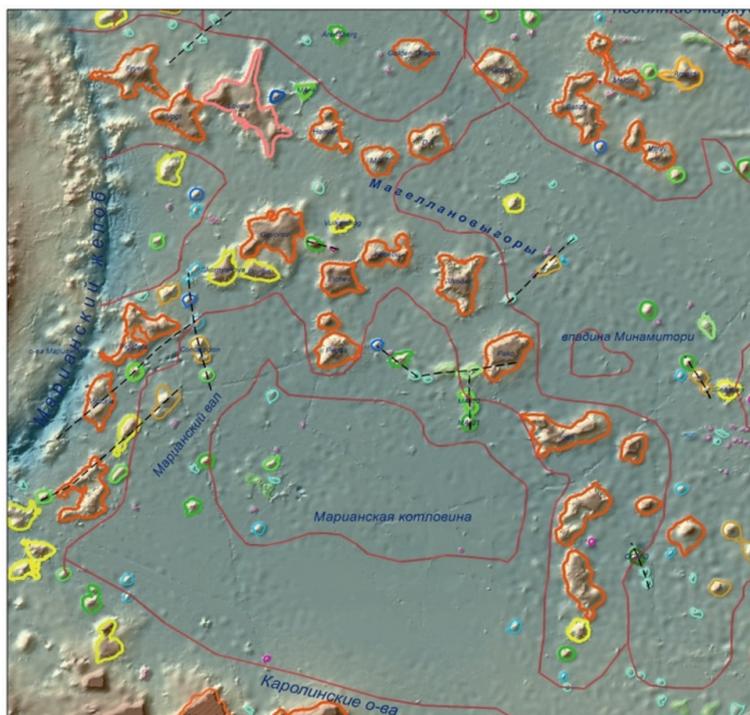
Использование морфологического анализа для оценки рудоносности подводных гор

Помимо выводов, полученных из анализа мелкомасштабных карт подводных гор, очень интересные результаты можно получить и из анализа крупномасштабных детальных карт. Изучение морфологических особенностей подводных гор имеет и прикладной аспект, поскольку именно к подводным поднятиям, преимущественно вулканической природы, приурочены кобальтоносные железомарганцевые корки. По своему составу корки являются полиминеральными образованиями и относятся к богатым кобальт-марганцевым рудам.

Наибольший интерес представляет район Магеллановых гор. На склонах и вершинах Магеллановых гор были обнаружены значительные скопления железомарганцевых корок и конкреций [3]. Магеллановы горы представляют собой протяженную, простирающуюся на 1500 км дугообразную цепь подводных гор, в основном, гайотов, окаймляющую Марианскую котловину в районе между 10° с.ш. и 19° с.ш. и 148° в.д. и 158° в.д. К настоящему времени в районе Магеллановых гор выполнен значительный объем геолого-геофизических исследований, пробурены скважины глубоководного бурения, проведено подводное фотопрофилеирование. На основе результатов широкополосной съемки эхолотом Simrad EM12 S-120 в рейсах НИС «Геленджик» в 1999-2003, а также данных глубоководного бурения и драгирования были построены подробные батиметрические карты с сечением изобат 25-50 м и детальные карты железомарганцевого оруденения подводных гор с распределением мощностей рудных корок и содержанием металлов [4-9].

С помощью инструментов ГИС была сделана работа по моделированию и выявлению пространственных закономерностей распределения железомарганцевых корок в зависимости от морфометрических характеристик гайотов. Используя инструменты ArcGIS (Spatial Analyst), были построены 3D поверхности рельефа подводных гор (рис. 8).

По данным поверхностям были построены производные морфологические поверхности: карты углов наклона, криватуры, степени изрезанности рельефа и др. Для построения карты изрезанности подсчитывалось количество особых точек (точки экстремумов и точки перегибов) в скользящем окне (Focalstatistic).



**Подводные горы
Классификация по размерам**



Рис. 7. Пример классификационного разделения подводных гор на примере кластера Магеллановых гор

Далее проходило сравнение этих характеристик с распределением корок различной толщины. Для этого рассчитывались (с помощью оверлейных операций) площади пересечения полигонов с различными значениями морфометрических параметров и полигонов распространения корок различной толщины. Используя статистические инструменты ArcGIS, строились графики зависимости распределения корок от морфометрических характеристик. На рис. 9 представлена зависимость площадей распределения рудных тел от глубины. Из графика видно, что молодые корки (корки малой толщины) распространены на глубинах 3500-4000 м, старые (толщина > 7 см) – на глубинах 2000-2300 м.

Из рис. 10 видно, что имеется зависимость распространения корок от углов наклона рельефа, наличие корок резко уменьшается на углах >25 и меньше 3 градусов. Но для корок различной толщины наблюдаются различные максимумы. Также была выявлена прямая положительная зависимость от степени изрезанности рельефа.

Из карт криватур, на которых выделяются выпуклые и вогнутые формы рельефа, было выявлено, что корки преимущественно распространены на выпуклых протяженных участках подводных гор (бровка плоской вершины, крупные трюги).

Далее карты морфологических признаков были перестроены в зависимости от выявленных зависимостей каждого признака и распределения рудных залежей

в производные карты. Значениям каждого параметра давался свой весовой коэффициент в зависимости от его вклада в формирование рудных залежей. При суммировании всех параметров была построена результирующая карта прогнозного признака. На рис. 11 показана расчетная карта прогнозного признака на гайоте Ита-Май-Тай. Сходство этой карты с картой распространенности корок и их мощностей доказывает, что нам удалось построить достаточно близкую к реальности прогнозную модель формирования руд. Таким образом, мы можем использовать полученные результаты для прогнозного моделирования рудных залежей и оценки их запасов без проведения детальных разведочных работ и на других гайотах.

Выводы

На основе батиметрических карт различного масштаба нами было проведено исследование такого геологического объекта, как подводные горы. Анализ был выполнен с помощью стандартных ГИС-методов обработки поверхностей.

Предложен алгоритм автоматического выделения полигонов подводных гор на карте. Выполнено их ранжирование по высоте и объему. Впервые предложена новая классификация подводных гор, выполненная на основе морфологических характеристик.

При анализе крупномасштабных батиметрических и геологических карт Магеллановых подводных гор удалось связать морфологию поверхности и

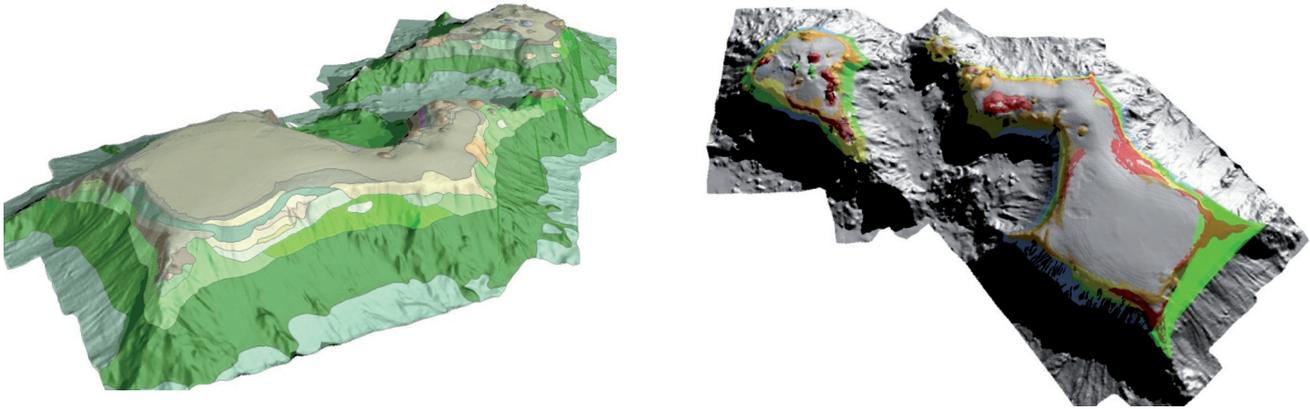


Рис. 8. Магеллановы горы. Гайот Ита-Май-Тай. 3D-модель рельефа и оруденения

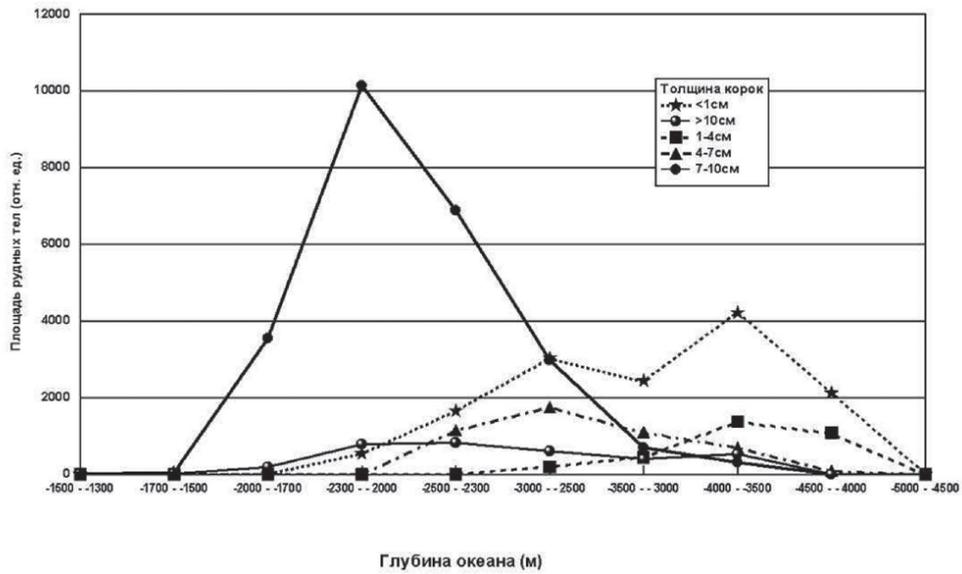


Рис. 9. Развитие рудных полей на поверхности гайота Ита-Май-Тай в зависимости от глубины океана

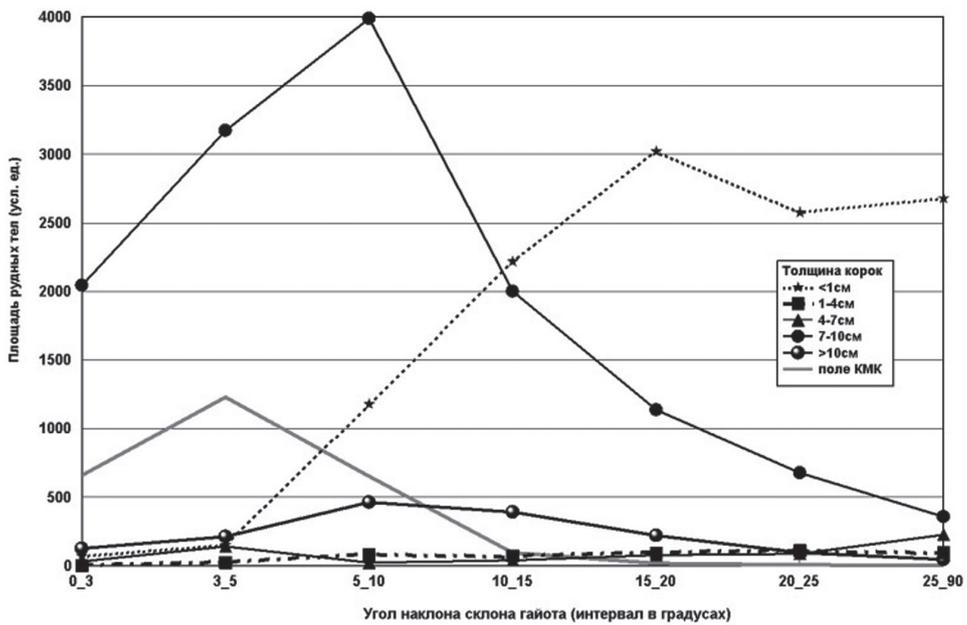


Рис. 10. Неоднородность развития рудных полей на поверхности гайота с различными углами наклона

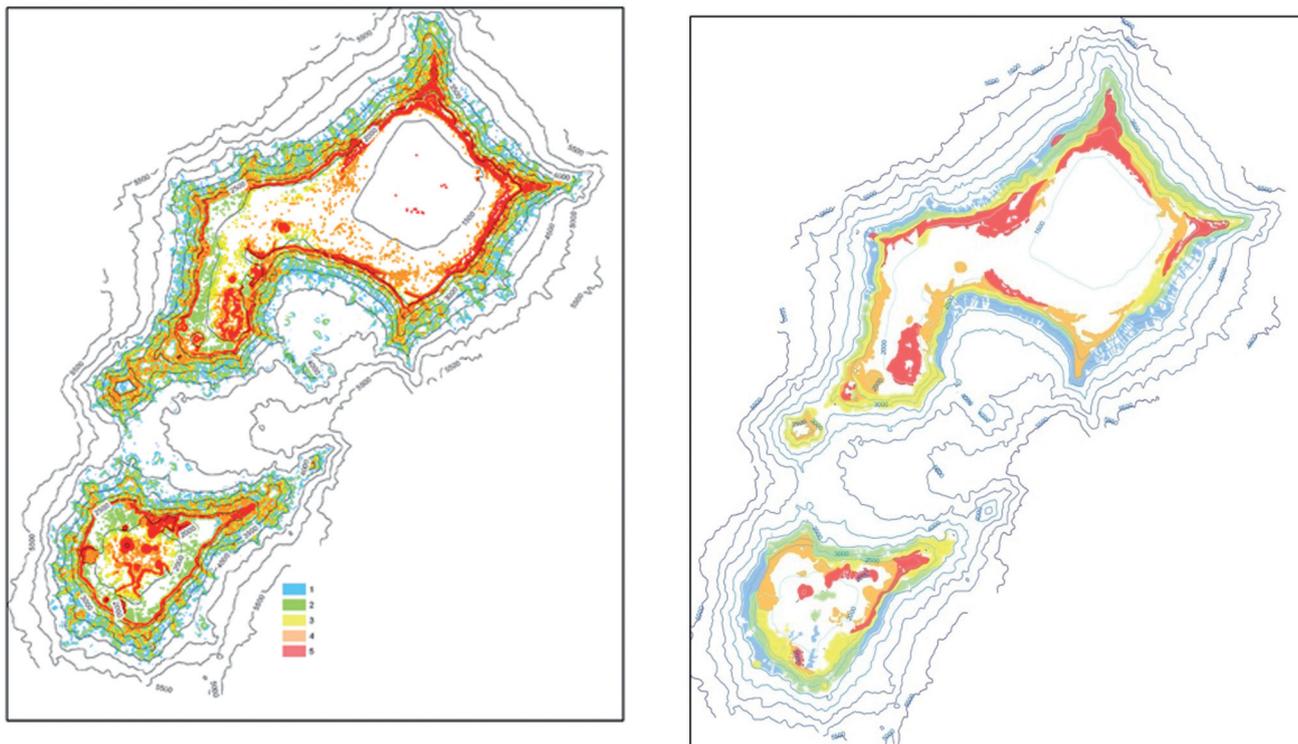


Рис. 11. Результирующая карта прогнозного признака (слева) и карта реального распространения ММК (справа) на гайоте Ита-Май-Тай

локализацию железомарганцевого оруденения. Этот аспект имеет большое прикладное значение.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 12-05-00974-а).

Ключевые слова: геоинформационные системы, подводные горы, морфологический анализ, железомарганцевые корки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Wessel P. Global distribution of seamounts inferred from gridded Geosat/ERS-1 altimetry // JGR. – 2001. – V. 106. – N. B 9. – P. 19431-19441.
 2. Писаренко В.Ф., Родкин М.В. Распределения с тяжелыми хвостами: приложения к анализу катастроф // Вычислительная сейсмология – Вып. 38. – М. : ГЕОС, 2007. – 240 с.
 3. Мельников М.Е. Месторождения кобальтоносных марганцевых корок. – Геленджик : ФГУПП ГНЦ «Южмор-геология», 2005. – 231 с.
 4. Мельников М.Е., Пономарева И.Н., Туголесов Д.Д., Рождественский В.Х. Результаты бурения кобальтоносных марганцевых корок на гайотах Магеллановых гор (Тихий океан) // Тихоокеанская геология. – 2005. – Т. 24. – № 5. – С. 36-49.
 5. Мельников М.Е., Сапрыкин С.С., Хулапова Т.М. Геологическая интерпретация материалов фототелевизионного профилирования поверхности подво-

дных гор // Вестник КРАУНЦ. Сер. Науки о Земле. – 2006. – Вып. 8.
 6. Мельников М.Е., Плетнев С.П., Басов И.А., Пунина Т.А., Пуляева И.А., Седышева Т.Е., Худик В.Д., Хулапова Т.Н., Захаров Ю.Д. Новые геологические и палеонтологические данные по гайоту Федорова (Магеллановы горы, Тихий океан) // Тихоокеанская геология. – 2006. – Т. 25. – № 1. – С. 3-13.
 7. Мельников М.Е., Плетнев С.П., Басов И.А., Пунина Т.А., Пуляева И.А., Седышева Т.Е., Худик В.Д., Т.Н., Захаров Ю.Д. Новые геологические и палеонтологические данные по гайоту Альба (Магеллановы горы, Тихий океан) // Тихоокеанская геология. – 2007. – Т. 26. – № 3. – С. 65-74.
 8. Мельников М.Е., Плетнев С.П., Басов И.А., Седышева Т.Е. Новые данные о морфологии и геологическом строении гайота Грамберга (Магеллановы горы, Тихий океан) // Тихоокеанская геология. – 2009. – Т. 28. – № 4. – С. 105-115.
 9. Мельников М.Е., Плетнев С.П., Седышева Т.Е., Пунина Т.А., Худик В.Д. Новые данные о строении осадочной толщи по гайота Ита-Май-Тай (Магеллановы горы, Тихий океан) // Тихоокеанская геология. – 2012. – Т. 31. – № 3. – С. 32-45.