

# Методические аспекты применения визуализации цифровых моделей рельефа для морфоструктурного и морфотектонического картографирования дна морей и океанов

**Гаврилов А.А.**

*Тихоокеанский океанологический институт имени В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток,  
e-mail: gavrilov@poi.dvo.ru*

Объекты морфоструктурного картографирования – эндогенные формы рельефа, несущие информацию о геологическом строении тех или иных участков литосферы. Морфотектонические карты демонстрируют геологические структуры, образующие основу морфологического ландшафта. Для новообразованных и молодых эндогенных форм рельефа различия между данными объектами картографирования и исследования минимальны, но для длительно экспонированных на поверхности литосферы структур, претерпевших ряд тектонических и экзогенных преобразований, более, чем значимы. Типичные примеры подобных различий – гайоты, геоморфологические характеристики которых не позволяет напрямую соотносить их с вулканическими постройками и соответственно определять тип, возраст геологического субстрата. Многие линейные поднятия в виде подводных хребтов, представляют в морфотектоническом аспекте цепи различных по размерам, времени формирования вулканоструктур, развивающихся сопряженно с зонами магмоконтролирующих разломов.

В зависимости от ряда факторов (возраст, изменчивость, полицикличность процессов тектогенеза, магматизма, инверсии тектонического режима, активное действие экзогенных факторов морфогенеза и др.) облик экспонированных на поверхности литосферы геологических структур и тел может сильно меняться во времени. Если морфоструктурный анализ направлен на решение прямой задачи геоморфологии (от анализа рельефа к изучению геологического содержания), то морфотектоника обеспечивает решение обратной. Специфика объектов и предметов исследования этих дисциплин обуславливает различную приоритетность использования геологической, геофизической, геоморфологической информации, материалов дистанционного зондирования из космоса и разные подходы к интерпретации данных. На территориях со сложным геологическим строением целесообразно проведение комплексного морфоструктурно-морфотектонического анализа при неоднократном решении прямой и обратной задач структурной геоморфологии: рельеф – геологическая среда, геологическая среда – рельеф и т. д., до установления между формами рельефа и геологической основой всей совокупности (во времени и пространстве) имеющихся детерминированных связей [2].

Визуализация глобальных цифровых моделей рельефа (ЦМР) ETOPO 1, 2, GEBCO 2014 (<http://Ocean3dprojects...>) в комплексе с материалами дистанционного зондирования Земли из космоса в рамках существующих программ (Arcview GIS 3x, Google Earth и др.) открывает принципиально новые возможности для изучения геоморфологии и геологии дна морей, океанов. Перспективы связаны, в частности, с применением при анализе изображений методик морфоструктурного анализа и космогеологического дешифрирования. Особенно целесообразно применение данных дешифрирования 3D моделей подводного рельефа при изучении подводных возвышенностей разного типа, ранга и выступов акустического фундамента, которые отличаются относительно небольшим чехлом рыхлых отложений.

Опыт применения геоморфологических, космогеологических и морфотектонических исследований окраинно-континентальных орогенных областей Востока Азии, дна прилегающих морей и Тихого океана [1-4; 6, 7] показывает, что, в соответствии со спецификой их геологического строения и развития, главные объекты исследований – разрывные нарушения и очаговые системы, выраженные на ПЛ кольцевыми морфоструктурами, структурами. Они же

определяются как образования центрального типа (МЦТ, СЦТ). Выявление и выделение очаговых систем на суше предполагают использование комплекса ландшафтных, геоморфологических, геологических, геофизических данных и материалов дистанционного зондирования из космоса. В зависимости от размеров, ранга, возраста выделяемых объектов и степени изученности территории набор используемых признаков и показателей меняется [5]. Постоянными признаками остаются: круговой, кольцевой рисунок и концентрическое строение выделяемых аномалий фотона, поля высот, геофизических полей; кольцевая геометрия геологических тел, структур; радиально-концентрическая зональность различных характеристик объектов; наличие упорядоченного расположения элементов внутреннего строения – монополярного, ядерно-сателлитного и орбитально-сателлитного унифицированных типов инфраструктур [1].

Более сложны индикация и идентификация кольцевых аномалий изображений дна акваторий, где моделируемый рельеф отображается на основе комплексирования данных, полученных различными системами спутниковой альтиметрии (цифровые модели высот геоида, уклонения отвесных линий, аномалий силы тяжести в свободном воздухе), результатов эхолотных съемок и измерений. Достоверность выделения кольцевых аномалий фототона, соотносимых с проекциями очаговых структур обычно подтверждается серией данных. Это – выдержанность параметрических и морфологических (купольные или воронкообразными и др.) характеристик кольцевых аномалий на различных участках дна, расположенных друг от друга на десятки и более км; радиально-концентрическая батиметрическая зональность форм рельефа; их упорядоченное, с элементами трансляционной симметрии, размещение в пределах полос выделяемых линеаментов, соотносимых с зонами магмоконтролирующих разломов; наличие принципиально похожих особенностей внутреннего строения кольцевых аномалий, имеющих дуговые, кольцевые и радиальные элементы, концентры и унифицированные типы размещения сателлитных элементов очаговых систем [3, 4].

В качестве основных признаков линейных аномалий (линеаментов), соотносимых с зонами разрывных нарушений, на изображениях (Google Earth) рассматривались: протяженные (непрерывные или дискретные) узкие линейные или более широкие полосовые аномалии фототона, отличающиеся набором характерных черт, связанных с цветом, рисунком и структурой, или системами мелких деталей, элементов; 2) линейные границы разделов двух или более участков дна акваторий с различным окрасом, плотностью фототона; 3) дуговые, прямолинейные контуры впадин, поднятий, батиметрические уступы, блоковое строение рельефа; 4) цепи кольцевых аномалий, блоков и других форм, элементов рельефа, указывающих на линейную упорядоченность объектов в геологической и геоморфологической средах. Использование таких данных, как размеры островов, подводных возвышенностей, вулканических построек, мысов и других реперных объектов на батиметрических картах, позволяет уточнить параметры выделяемых на изображениях линейных, кольцевых аномалий и соотносимых с ними природных объектов. Известно, что GEBCO 2014 объединяет данные международных, национальных, региональных научных и научно-производственных организаций, институтов и комплекса доступных экспедиционных батиметрических измерений, приведенных к узлам 30 секундной градусной сетки, начиная с глубин 200 м. Высокая разрешающая способность изображений рельефа дна акваторий достигается синтезом материалов спутниковой альтиметрии и данных батиметрических карт, полученных в ходе детальных эхолотных съемок, проведенных в том или ином районах. Для заверки выявленных геоморфологических аномалий центрального и линейного типов типа используется комплекс имеющихся геологических, геофизических материалов по принципу необходимо и достаточно.

Процедура геоморфологической индикации осложняется тем, что конформная связь неровностей земной поверхности с геологическими телами и дислокациями отражает не только структурный, геодинамический, но и морфолитодинамический (морфоскульптурный) аспект морфогенеза, связанный с различной устойчивостью горных пород к процессам разрушения, эрозии и денудации. Существенно осложняет идентификацию элементов структурного плана явления геоморфологической конвергенции и гомологии, так как многие формы рельефа при

подобии геоморфологических характеристик могут иметь разный генезис и возраст.

С целью выявления аномалий рельефа с характерными признаками МЦТ автором был проанализирован комплект батиметрических карт М 1: 2 000 000, покрывающих около 70 % площади дна Тихого океана. Последующая выборочная заверка их на основе геолого-геофизических материалов позволила оценивать эти закономерно организованные комплексы форм рельефа как очаговые образования разного генотипа и ранга: от отдельных вулканических построек, их упорядоченных группировок центрального и линейного типов до мантийных диапиров. Часть этих аномалий была заверена на основе данных 3D моделей цифрового рельефа, созданных на основе глобальной базы батиметрических данных GEBCO 2014 в рамках программы Google Earth (рис. 1).

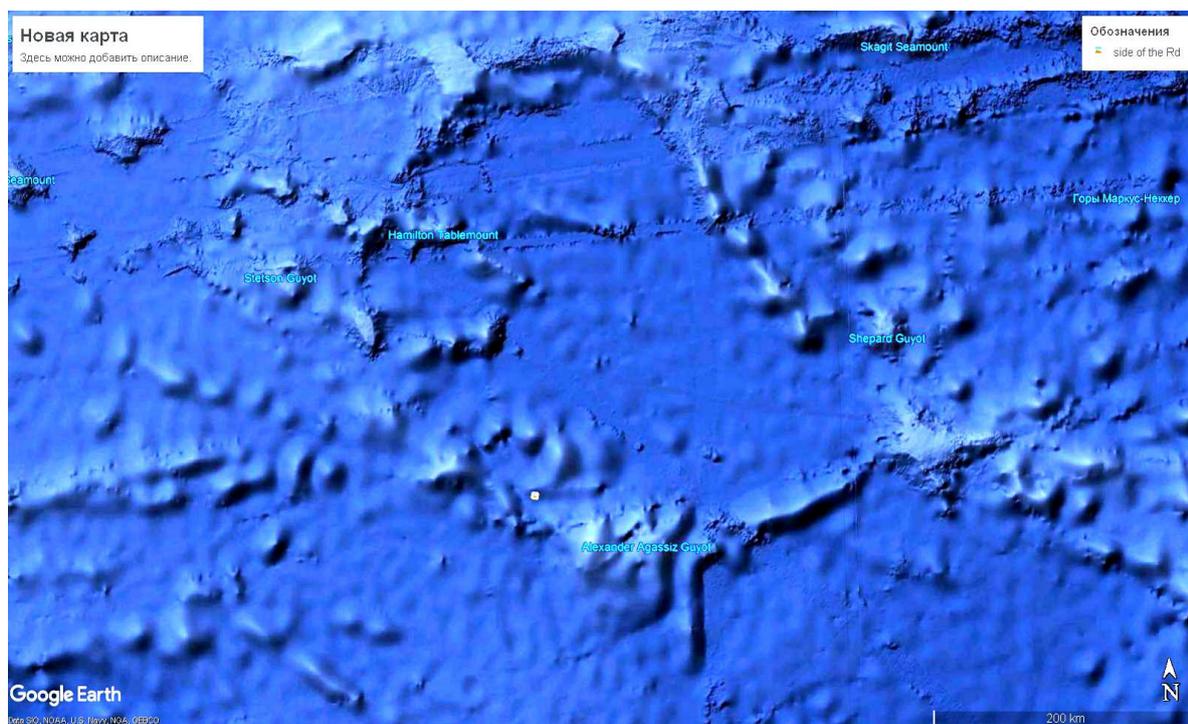


Рис. 1. Одна из кольцевых структур на дне Тихого океана по данным (GEBCO 2014, <http://Ocean3dprojects>, в рамках программы Google Earth). Горы Маркус-Неккер. Координаты геометрического центра МЦТ 19° 30' сев. ш., 178° 30' вост. долг. R = 200-250 км

Общее количество выявленных геоморфологических аномалий, имеющих радиусы от десятков до первых сотен км, более 150. При наличии унифицированных характеристик, они различаются географической и тектонической позицией, параметрами, особенностями морфологии, внутреннего строения [3, 4].

В ходе более детальных исследований северо-западных участков дна Японского моря, впервые были получены данные о качественных и количественных характеристиках структурных элементов подводных возвышенностей и прилегающих участках дна Центральной котловины Японского моря. Установлено, что возвышенность Богорова и ряд других поднятий представляют собой комплексы палеовулканических построек центрального типа, образующих с разрывными нарушениями и узлами их пересечений единые тектономагматические системы (рис. 2). Определены параметры, морфологические характеристики, особенности внутреннего строения (типы инфраструктур) палеовулканических структур, выявлены пространственные и иерархические (два ранга) системы разрывных нарушений и очаговых образований. Крупные концентрические группировки палеовулканов идентифицируются с проекциями мантийных диапиров. Впервые выявлен крупный широтной разлом (возможно, трансформный), который разделяет линейное поднятие Богорова на северный и южный блоки. Он состоит из серии субпараллельных разрывных нарушений и представляет собой единую зону дислокаций шириной более 5 км, которая проходит через всю Центральную котловину и протягивается

далее на запад до бровки шельфа, но не прослеживается в пределах континента. Полученная информация позволяет с новых позиций оценить адекватность существующих моделей формирования и развития окраинно-континентальной впадины Японского моря [4].

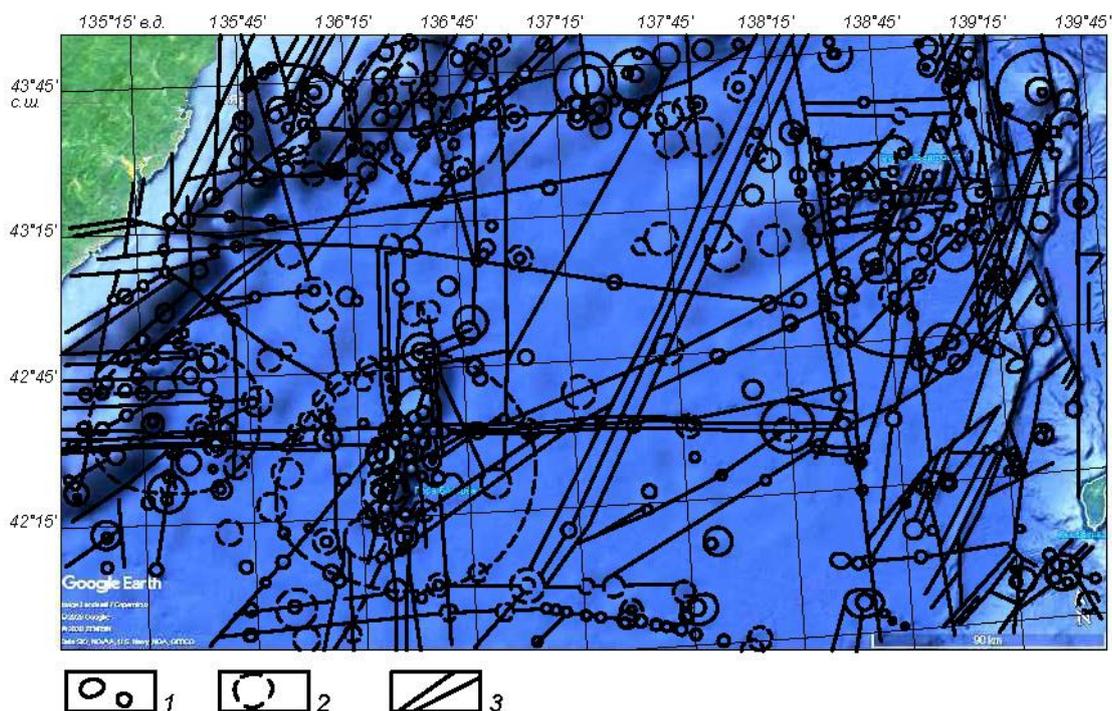


Рис. 2. Схема размещения кольцевых аномалий, соотносимых с проекциями палеовулканических центров, мантийных диапиров, и линеаментов, сопоставляемых с зонами разломов, северной части Центральной котловины Японского моря. Составлена по данным дешифрирования визуализированной ЦМР (GEBCO 2014) в рамках программы Google Earth (Гаврилов, 2022)

1-2 – кольцевые аномалии, соотносимые с проекциями очаговых систем разного ранга:  
1- выраженные отчетливо, 2 – проявленные менее контрастно; 3 – линеаменты.

#### Литература

1. Гаврилов А.А. Структурно-геометрическая типизация и гомология геологических систем центрального типа // Известия АН СССР. 1990. Сер. геол. № 12. С. 89–96.
2. Гаврилов А.А. Морфотектоника окраинно-континентальных орогенных областей (юг Дальнего Востока и прилегающие территории). Владивосток: ТОИ ДВО РАН, 2017. 312 с.
3. Гаврилов А.А. Космогеологическая индикация морфоструктурных элементов побережий и дна прилегающих акваторий (зал. Петра Великого, Японское море) // Океанология. 2021. Т. 61. № 4. С. 633–648.
4. Гаврилов А.А. Новые данные о строении подводных возвышенностей Богорова, Тояма и прилегающих участков дна Японского моря (по результатам геоморфологических и космогеологических исследований) // Исследования Земли из космоса. 2022. № 3. С. 17-29.
5. Кольцевые структуры континентов Земли / В.Н. Брюханов, В.А. Буш, М.З. Глуховский и др. М.: Недра, 1987. 184 с.
6. Gavrilov A.A. The Darwin Rise and geomorphologic-geological indication of focal systems on the Pacific ocean floor // New Concepts in Global Tectonics (NCGT) Newsletter. 2015. Vol. 3. N 2. P. 196–207.
7. Gavrilov A.A. Ring structures of the Pacific Ocean bottom and some problems with their investigations // NCGT Journal. 2018. Vol. 6. N 2. P. 172–202.