

УДК 551.465

ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННОЙ АНАЛИЗ ГЕОМОРФОЛОГИИ ДНА ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО (ЯПОНСКОЕ МОРЕ)

© 2014 г. Р. А. Коротченко¹, А. Н. Самченко¹, И. О. Ярошук^{1,2}

¹Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева ДВО РАН, Владивосток

²Дальневосточный федеральный университет, Владивосток

e-mail: romankor@mail.ru

Поступила в редакцию 23.08.2012 г., после доработки 02.04.2013 г.

На основе материалов судовых измерений, спутниковой информации систем GTOPO1 и ASTER, баз данных GEBCO и карт батиметрии создана цифровая модель территории, охватывающая шельф залива Петра Великого Японского моря. Методом двумерного сингулярного спектрального анализа выполнена масштабная декомпозиция рельефной поверхности шельфа на компоненты с главной тектонической структурой, зонами вторичной складчатости и формами, возникшими при осадко-накоплении. Выполнено сопоставление с геологическими сведениями о территории Южного При-морья для уточнения возраста тектонических образований различного масштаба.

DOI: 10.7868/S0030157414030046

ВВЕДЕНИЕ

Изученность рельефа шельфа является необходимой составляющей успешных исследований в области геоморфологии, геологии, геофизики и гидроакустики, поскольку рельеф отражает развитие геодинамических процессов региона. Изучение поверхности дна с позиции истории сейсмической активности позволяет узнать ее прошлое и оценить вероятность возможных катастрофических событий в ближайшем будущем. Из-за сильного влияния рельефа на характеристики течений и приливных явлений необходимо учитывать влияние топографии дна при оценивании экологических рисков и мониторинге техногенного влияния в процессе загрязнения океанских вод.

Объективное понимание эволюционного развития рельефа требует учета таких основных факторов, как геотектоника региона и процессы осадкообразования. Поскольку в геологии основными являются описательные методы, актуально применение современных методов сбора, обработки и численного анализа данных, позволяющих перейти на следующий уровень исследований. В силу разнообразия форм рельефа требуется создание подходящих моделей для интерпретации генетических особенностей поверхности дна океана. На примере залива Петра Великого Японского моря (рис. 1) выполнен численный анализ рельефа поверхности с разложением по пространственным масштабам, имеющий прямое отношение к происходившим в различные геологические эпохи тектоническим процессам. Обоснованию статистического анализа глобального рельефа и полу-

чению некоторых закономерностей энергетического баланса при формировании современного очертания поверхности планеты посвящены следующие работы [3, 11, 14, 15]. Более конкретные исследования подобного рода описаны [6, 7, 10].

Новизна данной работы состоит во взаимосвязанном восприятии информации из источников натуральных данных о рельефе, геологического описания и результатов анализа данных современными численными методами. Необходимая совокупность информации была отобрана по материалам судовых измерений, дополнена оцифровкой карт региона и сведениями, предоставляемыми NASA (ETOPO1, ASTER) и GEBCO [16–18]. Фрагмент детальной пространственной сетки в районе залива Посьета основан на оригинальных данных батиметрической съемки, выполненной в 2009–2010 гг. [4]. По результатам цифровой обработки рельефа на основе двумерного сингулярного анализа рассмотрена согласованная с геологическим описанием интерпретация стадий и масштабов тектонических процессов, определяемых геометрией и протяженностью выделенных складчатых деформаций.

СРЕДСТВА И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исходным пунктом исследования геоморфологии является создание цифровой модели рельефа. Использование спутниковых данных и базы данных GEBCO позволяет создать основу модели морского дна на сетке с шагом около 600 м. Для залива Петра Великого такого разрешения недостаточно. Уточнение модели потребовало, во-

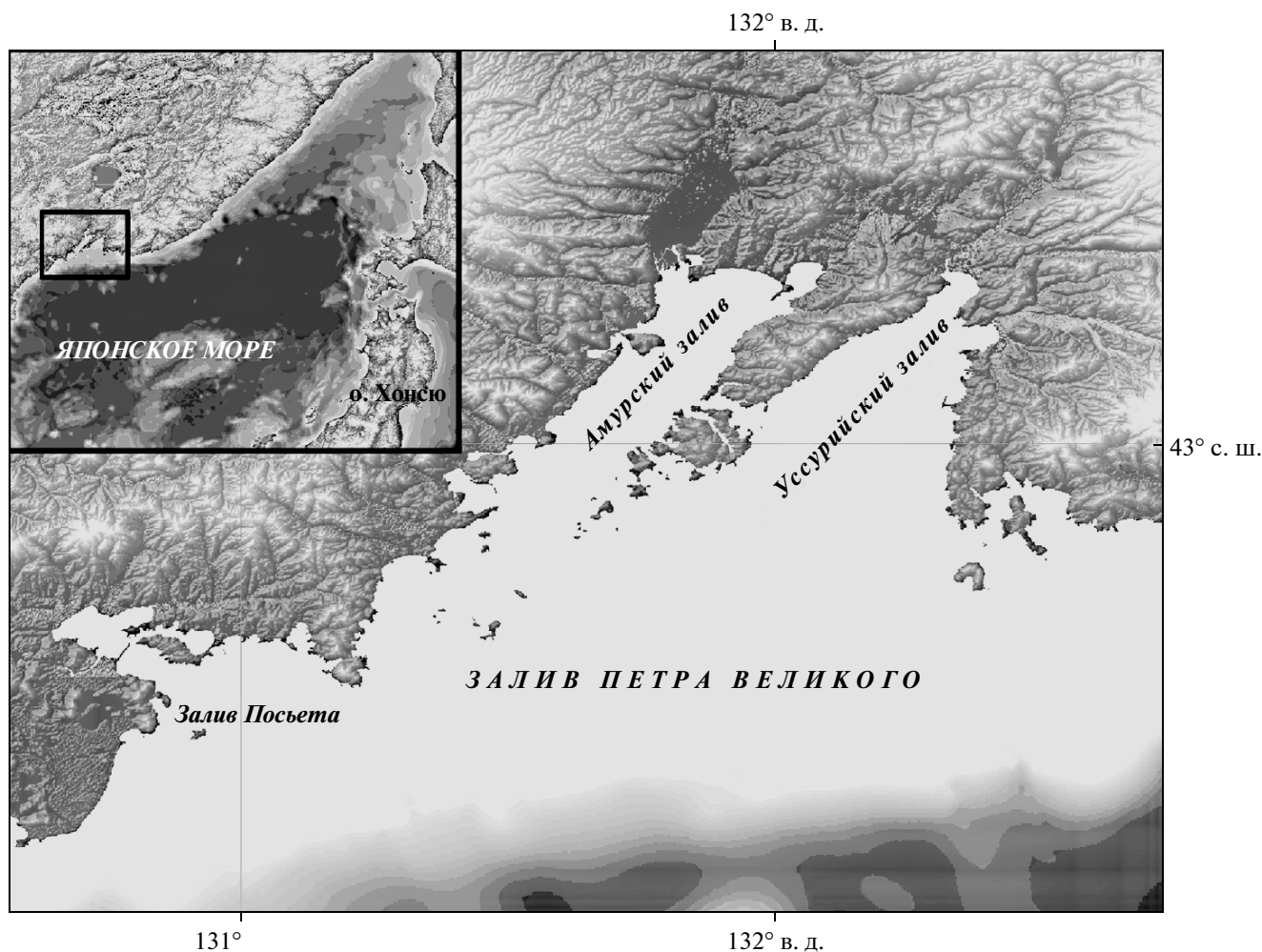


Рис. 1. Залив Петра Великого.

первых, выполнить оцифровку батиметрических карт и, во-вторых, собрать доступную информацию судовых измерений. Личный вклад в получение данных в ходе экспедиционных исследований состоял в проведении батиметрических наблюдений в заливе Посьета с НИС “Малахит” в 2009–2010 гг.

Основываясь на исторической изменчивости береговой линии, было принято решение не ограничиваться данными о батиметрии залива, а охватить прилегающую территорию, поскольку морские границы – это переменные характеристики, отражающие развитие геотектонических процессов и колебаний уровня океана. Данные альтиметрии прилегающего к заливу района были получены из самой точной опубликованной на сегодняшний день цифровой топографической карты Земли ASTER GDEM, предоставляемой Американским и Японским космическими агентствами, с пространственным разрешением примерно 70 м [16].

Цель работы состоит в выделении пространственной масштабной шкалы структурных составляющих рельефа и ее сопоставлении с тектоническими особенностями региона. Основываясь на соотношении между размерами рельефных структур и затраченной энергией при развитии тектонических процессов, в качестве основного метода обработки использовался двумерный сингулярный спектральный анализ (ССА), входящий в состав метода естественных (эмпирических) ортогональных функций (ЕОФ) [12]. ЕОФ является одним из наиболее востребованных инструментов в метеорологии, физике атмосферы и океана [2, 13]. Принцип ЕОФ состоит в “расщеплении” исходных полей данных на пространственные структуры максимальной вариации и “измерении” относительного вклада каждой структуры. Прямая связь между масштабами вариаций и энергетикой тектонических процессов определяет адекватность применяемого математического аппарата.

Обработка состоит из двух стадий: декомпозиции и реконструкции. На этапе декомпозиции данные о высотах рельефа организуются в виде специальной траекторной матрицы W . Для этого поле высот разбивается на сегменты равной площади, выполняется усреднение по этим фрагментам и затем формируется траекторная матрица W . Далее вычисляется разложение вида

$$W = \sum_{i=1}^d W_i = \sum_{i=1}^d U_i \sqrt{\lambda_i} V_i^T,$$

где $\{\lambda_i\}$ — собственные значения, $\{U_i\}, \{V_i\}$ — ортонормальные системы левых и правых сингулярных собственных векторов.

В отличие от классического спектрального анализа, в котором функции разложения заданы изначально как набор синусов и косинусов, в ССА эти функции определяются из самих данных и формируют ортогональный базис разложения, оптимальный в статистическом смысле. В результате разложения исходного поля высот ожидается, что оно будет представлено в виде суммы гладкой поверхности, осцилляций и шума. Соответствие вкладов определяется амплитудой собственных значений. Относительный вклад в полную вариацию от сингулярного значения определяется как

$$\lambda_k \left(\sum_{i=1}^d \lambda_i \right)^{-1}.$$

Этап реконструкции (группирования) основан на выборе подмножества собственных векторов (мод) и проекции исходного поля на выбранное подпространство. Восстановление происходит при суммировании по заданному набору индексов. Этим достигается выделение одних составляющих поля и фильтрация других. Подробности алгоритма изложены в [12].

Разделение рельефных структур по их вкладу в суммарную вариацию дает информацию не только об энергетических уровнях их формирования, но и о временных рамках развития, поскольку существует связь масштаба, энергетических затрат и интервалов времени для развития структур [3].

На заключительном этапе анализа рельефа результаты цифрового анализа интерпретируются в свете геологических данных о южном Приморье. Объединение информации формирует более полное понимание эволюции рельефа территории, включающей залив, и уточняет геоморфологическое описание территории.

СВЕДЕНИЯ О ГЕОГРАФИЧЕСКОМ ПОЛОЖЕНИИ И ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ ИСТОРИИ ШЕЛЬФА

Залив Петра Великого — самый большой залив Японского моря (рис. 1). Протяженность береговой линии залива, включая острова, около 1700 км,

его ширина почти 200 км, а площадь 55 600 км². В его пределах имеется множество островов и отдельных выступающих из воды скал. Самый крупный полуостров залива — Муравьева-Амурского — делит акваторию залива Петра Великого на две большие части — Амурский и Уссурийский заливы. Продолжением п-ова Муравьева-Амурского являются крупные острова: Русский, Попова, Рейнеке, Рикорда, архипелаг Римского-Корсакова. На западе залива расположен о. Фуругельма, а на востоке — о-ва Аскольд и Путятина. В залив впадает несколько крупных рек (Туманная, Раздольная) и много мелких речек и ручьев. Устьевые части многих рек в недавнем геологическом прошлом были затоплены морем, в результате чего здесь образовалось несколько заливов второго порядка — Амурский, Уссурийский, Восток, Америка. Подобное происхождение имеет и юго-западный залив Посыета.

Берега залива Петра Великого образовались в четвертичном периоде, для которого характерно чередование трансгрессивных и регрессивных эпох (наступления и отступления моря) [9]. Различные стояния уровня моря нашли свое отражение в надводных и подводных морских террасах, волноприбойных нишах, расположенных значительно выше современного уровня моря, затопленных пляжах и долинах рек [8]. Отроги горной системы Сихотэ-Алинь круто спускаются к Японскому морю, образуя скалистые склоны, расчлененные ущельями. Многочисленные мысы, самые крупные из которых — мысы Гамова, Брюса, Янковского и дреки, сложены твердыми вулканическими породами — гранитами и порфиритами, а берега бухт (Витязь, Славянка, Горностай и т.д.) — осадочными породами — сланцами и песчаниками. Береговая линия залива Петра Великого за время его существования претерпела значительные изменения в результате разрушающего действия волн и накопления осадков — песков, галечников и илов, выносимых в прибрежную зону реками и ливнями.

АНАЛИЗ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ РЕЛЬЕФА ЗАЛИВА ПЕТРА ВЕЛИКОГО

Использование высокоточных цифровых данных ASTER GDEM дает на суше разрешение порядка 10 м по высоте и 70 м по долготе и широте. Компиляция доступных ресурсов данных батиметрии (картографии, GEBCO и судовых измерений) определила среднее разрешение для залива Петра Великого 2–4 м по вертикали и около 300 м по горизонтали. Объединенная цифровая модель прилегающей территории и залива была определена на сетке размерностью 981 × 701 с шагом между узлами 100 м. Перепад высот на подготовленной сетке составил около 2500 м — от глубины 2250 м до высоты 920 м.

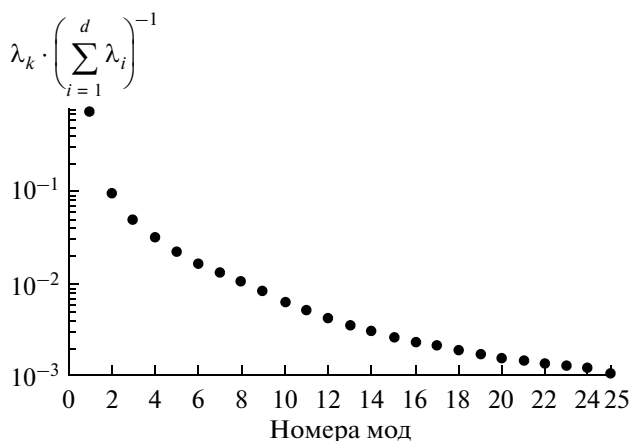


Рис. 2. Относительный вклад рассчитанных собственных значений в полную вариацию.

После сглаживания и адаптации к вычислительным возможностям компьютера была сформирована расчетная сетка с ячейками 400 × 300 метров. Чтобы уменьшить негативное влияние на вычисления большого перепада высот была выполнена трансформация амплитуд высот и глубин с помощью логарифмирования.

На первом этапе двумерного сингулярного спектрального анализа выполнялась декомпозиция рельефной поверхности на компоненты различных масштабов — разложение по двумерным ортогональным функциям (модам) [12]. После перебора расчетных параметров был выбран оптимальный вариант выбора базиса, позволяющий реконструировать рельеф с достаточным разрешением.

Физическая интерпретация мод и собственных значений связана с понятием энергии рельефа — показателем потенциальной интенсивности или возможного проявления тех или иных релье-

фообразующих процессов. Поскольку элементы, содержащие информацию о высотах местности, могут быть интерпретированы как источники потенциальной энергии, то модовый состав имеет смысл комбинации таких источников, при этом полная вариация разложения пропорциональна потенциальной энергии рельефа, а относительные собственные значения соответствуют удельному вкладу каждой моды в полную вариацию (рис. 2). Отметим использование логарифмической оси Y на рис. 2, что показывает на графике более чем экспоненциальное убывание вклада в вариацию с ростом номера моды.

Для разработанной цифровой модели рассчитывался набор из 41 моды. Для выделения наиболее принципиальных элементов сформированного рельефа использована реконструкция на основании 1–10 мод, суммарный относительный вклад от собственных значений которых в полную вариацию составил 0.96. Компоненты рельефа из более высоких мод разложения рассматривались как “уровень шума” для целей настоящего исследования.

После реконструкции с помощью 1–10 мод сохранен принципиальный рельеф батиметрии и побережья (рис. 3). Изолинии и тональный цвет отчетливо прорисовывают генеральную линию побережья, структуру глубин шельфа, выделяют внутренние залив Посьета на западе и Амурский залив на востоке. Светлый фон соответствует прибрежному мелководью и зоне малых высот. Наиболее контрастно выделены свал глубин на юго-западе и отроги Сихотэ-Алиня на севере.

Основной целью декомпозиции является разделение региональных и локальных компонент рельефа. Для этого выполнены отдельные реконструкции модели из 3-х наборов ЕОФ: одной 1-й моды, группы из 2–4-й и группы из 5–10-й моды. Масштаб вкладов можно оценить по значениям в таблице.

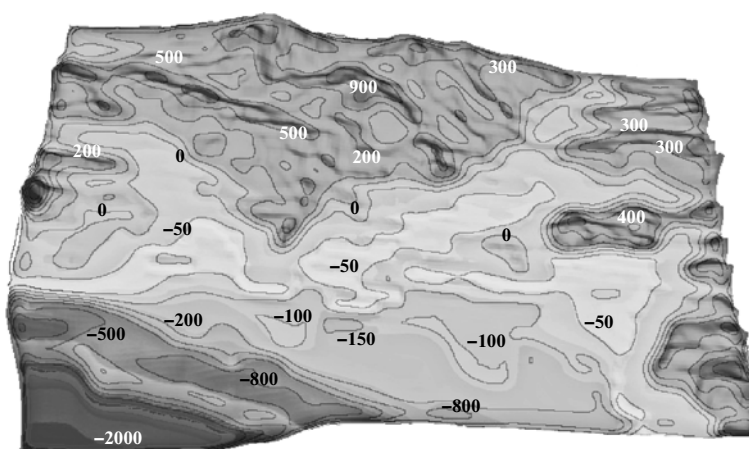


Рис. 3. Реконструкция рельефа на основе 1–10 мод.

Относительный суммарный вклад групп реконструкции

Группа ЕОФ	1-я мода	2–4 моды	5–10 моды
Относительный вклад в вариацию	0.71	0.18	0.08
Перепад высот, м	3000	60	10

Поверхность, представленная 1-й модой разложения (рис. 4), представляет основную тектоническую формацию. Относительно фундамента выделяется гористая деформация и глубоководный свал. Выделенный рельеф входит в состав наиболее крупных тектонических элементов регионального масштаба – Сихотэ-Алинской области мезозойской складчатости, залегающей на

фундаменте, принадлежащем Прибрежному антиклинорию и Главному синклинорию Сихотэ-Алиня [8] (на рис. 4б указаны географические координаты изучаемой территории). Необходимая энергия для тектонических процессов подобного рода и время, затраченные на развитие крупных деформаций земной коры, определяют восприятие таких структур как главенствующих в рассматриваемом регионе. Согласно геологическим исследованиям Приморского края, наиболее древними выделяются силурийско-девонские отложения в составе Прибрежного антиклинория. Это указывает на то, что тектоническое развитие выделенных структур началось примерно 400 млн. лет назад в палеозое и продолжалось в эпоху мезозойской складчатости [8, 9]. Сформировавшийся Раз-

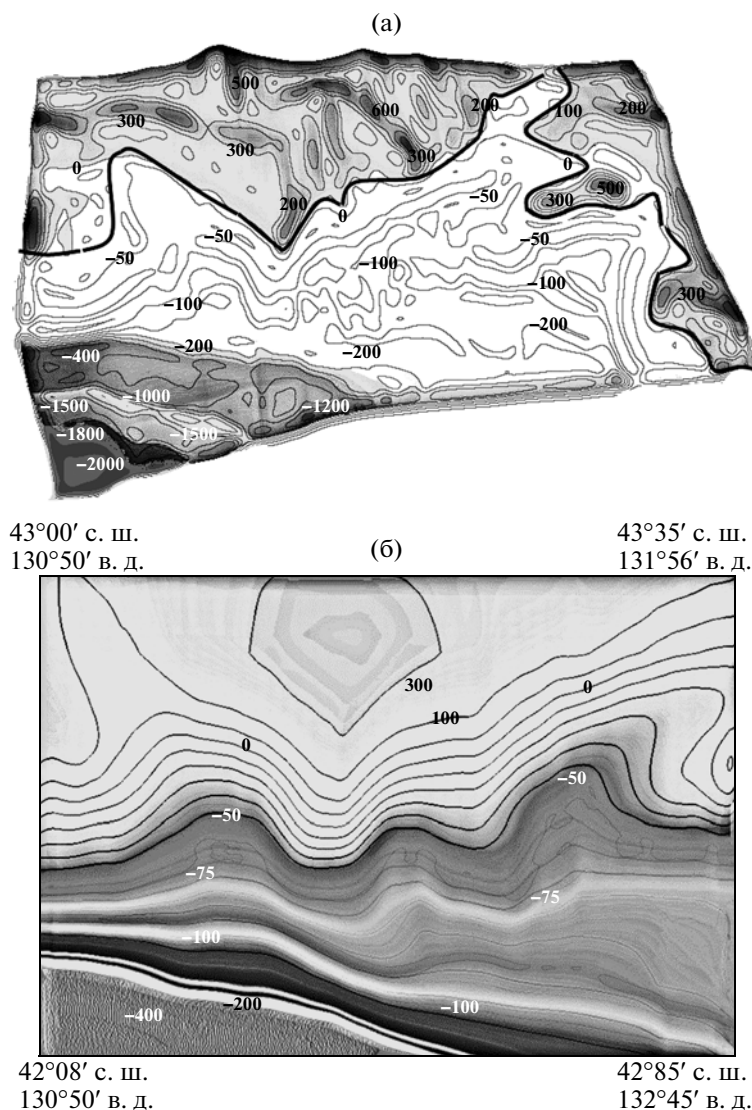


Рис. 4. Реконструкция модели рельефа для 1-й моды разложения. (а) – основная тектоническая формация. Перепад по вертикали от –2200 м до 900 м; (б) – изолинии и тональное выделение рельефа в диапазоне высот, характерных для шельфовой области.

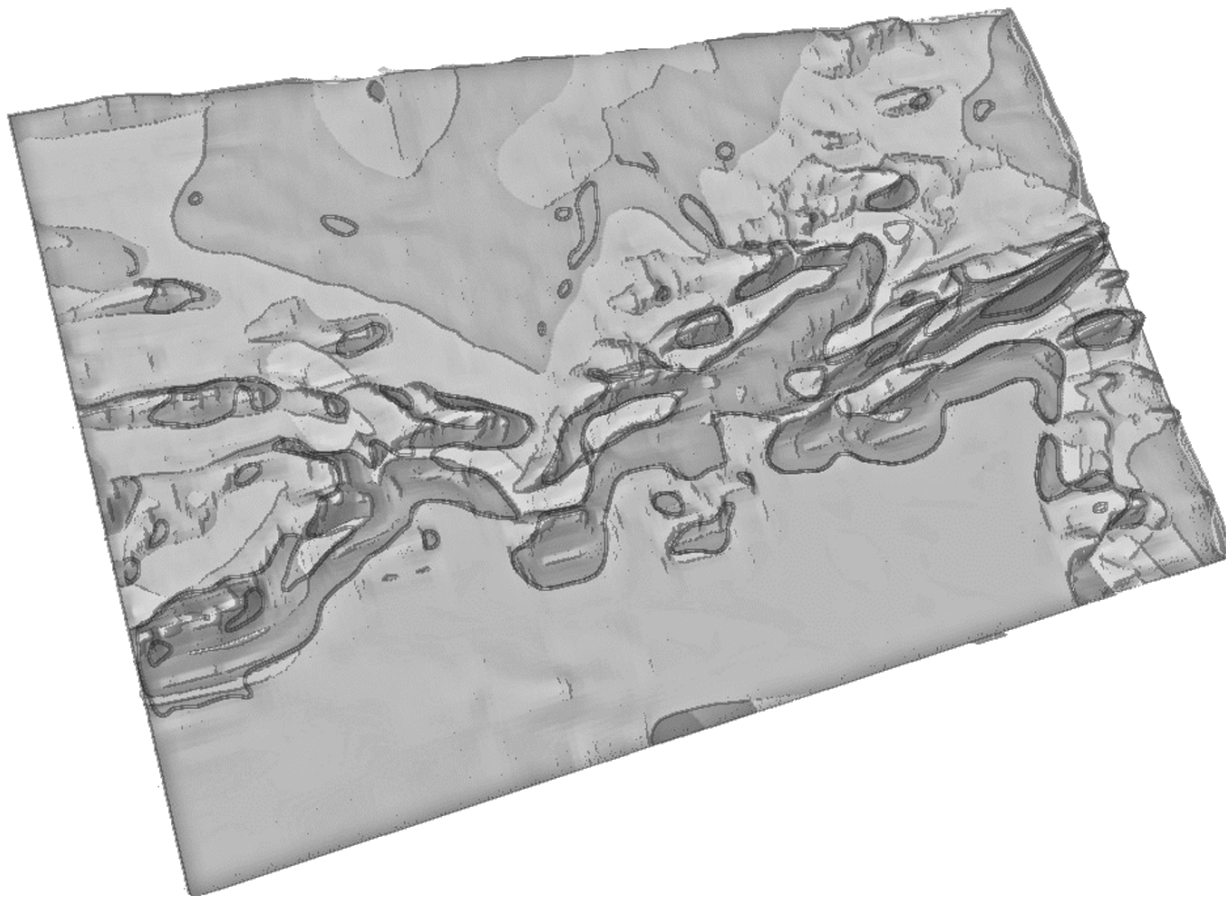


Рис. 5. Реконструкция для группы 2–4-й мод разложения с проекцией на основу – рельеф 1-й моды.

дольненский синклиальный прогиб (северо-восточный фрагмент на рис. 4) заполнен мощными мезозойскими и кайнозойскими отложениями. Уссурийский залив в составе Партизанского синклинория сложен складчатым комплексом пермских и мезозойских отложений.

Модель рельефа на основе 1-й моды разложения является репродукцией древней формы залива и прибрежной территории с обширной мелководной прибрежной областью. На рис. 4а отчетливо выделяются формы рельефа, характерные долинам могучих древних рек. В западной части – это область Ханкайской низменности, в восточной – территория Амурского залива и прилегающая зона Пушкинской депрессии. Цифровая модель в данном случае не только подтверждает известный геологический факт, но и более отчетливо прорисовывает русла на шельфе древнего залива до современных глубин 70–90 м, подтверждая интерпретацию долин как остатков крупных эстуариев [1].

Цифровая модель рельефа в базисе 2–4 мод разложения (рис. 5) соответствует тектоническим процессам меньшего масштаба, происходившим в более короткие сроки и более позднее время.

Выделенные вертикальные масштабы соответствуют десяткам метров. По горизонтали структуры протягиваются с юго-запада на северо-восток на дистанцию более сотни километров. Цифровой анализ явно выделяет формы, связанные с деформациями рельефа вдоль береговой зоны древнего залива – появлением островов, скалистых мысов и крупных бухт. Это привело к изменению имевшейся береговой линии и батиметрии залива. На рис. 5 отчетливо проявляется Муравьевский антиклинорий, вдающийся в залив Петра Великого в виде полуострова Муравьева-Амурского и плеяды островов, вытянувшихся с северо-востока на юго-запад. Согласно исследованиям, наиболее крупные мысы Гамова, Брюса, Янковского и Дреки сложены твердыми вулканическими породами – гранитами и порфиритами. Геологическое описание указывает на структуры позднепалеозойского, мезозойского и даже кайнозойского периодов [8]. На рис. 5 выделяется диагональная гористая складчатость с “вилкой” на левой границе. По геологическим данным выделенная складчатость сложена гранит-диоритовым комплексом пермского возраста, однако сформирована выделенная складчатость под влиянием других факто-

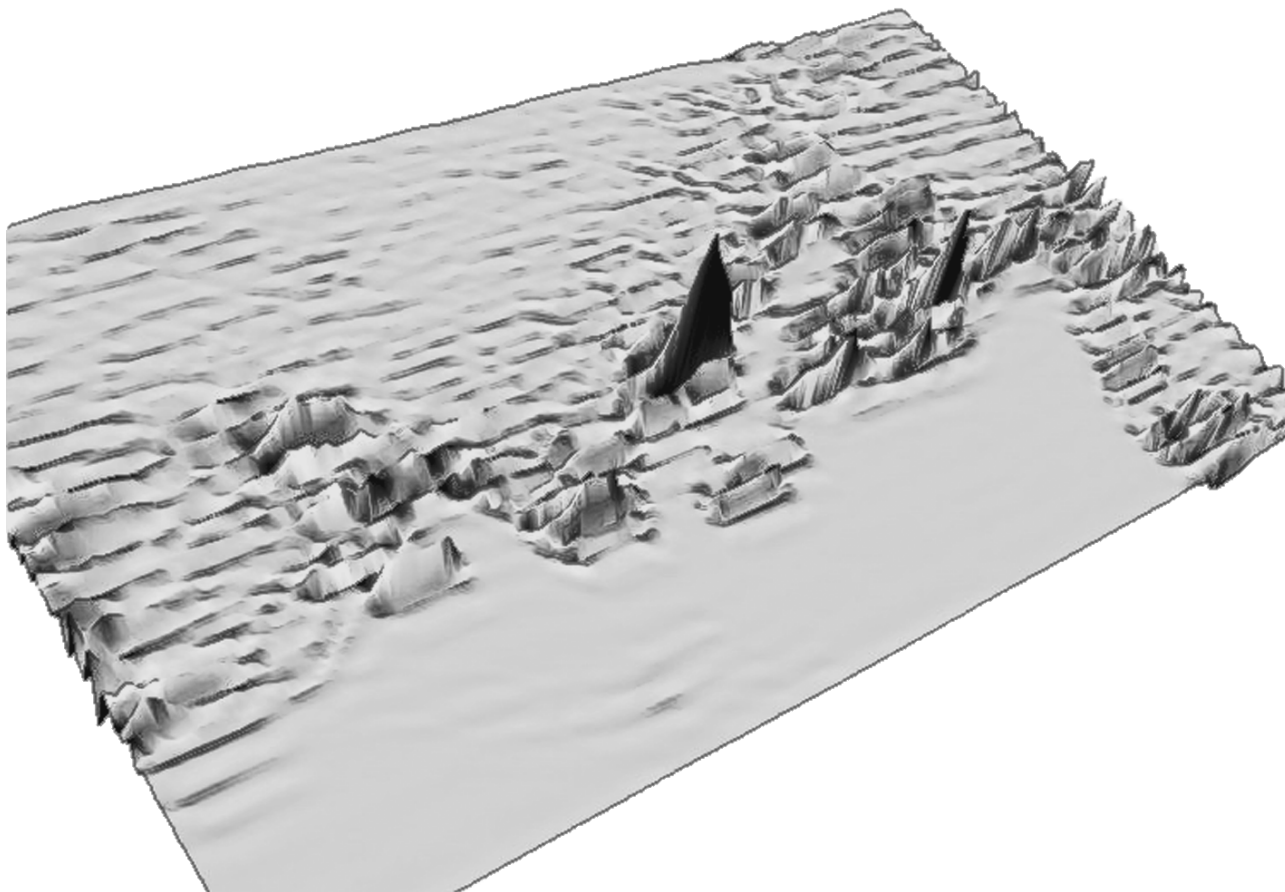


Рис. 6. Реконструкция модели рельефа для группы 5–10-й мод разложения.

ров, возможно вулканической активностью и подъемом базальтового слоя [5]. Подъем базальтового слоя прослеживается в Муравьевском антиклинории, проявляясь в цифровой модели резкими положительными градиентными зонами, вытянутыми с северо-запада на юго-восток.

Интересно отметить, что в модели на рис. 5 проявилось тектоническое “запирание” устьев древних рек. Поднятие поверхности привело к отделению части залива Посьета и Амурского залива от моря, в результате чего древние русла рек претерпели значительную деградацию.

Построенная цифровая модель на рис. 6 имеет небольшие амплитуды колебаний высот до 5 м, что объясняется вычислениями на грубой сетке и сглаживанием при осреднении. Центральные пики на рис. 5, 6 соответствуют областям с наибольшими высотами современного рельефа Муравьевского антиклинория. Интерпретация рельефа для масштаба 5–10 мод предполагает завершающую стадию формирования прибрежной зоны в результате экзогенных процессов и элементов вулканизма. Согласно геологическому описанию, берега залива окончательно оформились в четвертичном периоде в последние сто тысяч лет, для которых характерно

чередование эпох наступления и отступления моря. Рельеф на рис. 6 связан с поверхностными формами морского типа. Различные стояния уровня моря нашли свое отражение в надводных и подводных морских террасах, волноприбойных нишах, расположенных значительно выше современного уровня моря, затопленных пляжах и долинах рек. Чередование ледниковых и межледниковых эпох привело к образованию серии подводных и надводных террас. После окончания последнего (вюрмского) оледенения уровень океана начал повышаться, море затопило устья многих речных долин и низменности. Затем уровень моря снова несколько понизился и занял нынешнее положение [9].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе продемонстрировано применение новой, достаточно общей методологии цифрового анализа рельефа с использованием двухмерного ЕОФ-разложения. Обработка рельефа на основе таких алгоритмов встречается достаточно редко и в основном носит характер иллюстраций математических методов. В данном слу-

чае внимание перенесено на возможности и практику геоморфологического анализа. Более детально разбираются аспекты построения модели и ее анализа – от создания цифровой карты до выбора конкретного разложения и реконструкции. Сформированная цифровая модель с одной стороны согласуется и подтверждается имеющимся геологическим описанием, с другой – позволяет конструктивно уточнить и развить интерпретацию натуральных материалов. Пример изучения рельефа залива Петра Великого демонстрирует целесообразность применяемого подхода и может быть эффективно распространен на другие масштабы и регионы исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ветренников В.В.* Геологическое строение Сихотелинского заповедника и центрального Сихотелиния. Владивосток: Дальневосточное книжное издательство, 1976. Вып. 6. 167 с.
2. *Глуховский А.Б., Фортус М.И.* Оценка статистической надежности эмпирических ортогональных функций // Изв. АН СССР. Физ. атмосфер. и океана. 1982. Т. 18. № 5. С. 451–459.
3. *Голицын Г.С.* Статистическое описание рельефа поверхности планеты и его эволюции // Физика Земли. 2003. № 7. С. 3–8.
4. *Коротченко Р.А., Самченко А.Н., Ярошук И.О.* Применение статистических методов в изучении рельефа шельфовой зоны на примере залива Посыета Японского моря // Вестник ДВО РАН. 2011. № 6. С. 54–59.
5. *Кулинич Р.Г., Строев П.А.* О строении земной коры в юго-западной части Приморского шельфа и континентального склона // Океанологические исследования. 1973. № 23. С. 97–101.
6. *Леонтьев И.О., Рябчук Д.В., Сергеев А.Ю., Сухачева Л.Л.* О генезисе некоторых форм рельефа и дна берегов восточной части Финского залива // Океанология. 2011. Т. 51. № 4. С. 734–745.
7. *Леонтьев И.О., Рябчук Д.В., Спиридонов М.А., Куренной Д.Н.* Береговой профиль восточной части Финского залива: результаты наблюдений и реконструкция развития в позднем голоцене // Океанология. 2010. Т. 50. № 6. С. 1033–1044.
8. *Лихт Ф.Р., Астахов А.С., Боцул А.И. и др.* Структура осадков и фаций Японского моря. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1983. 286 с.
9. *Марков Ю.Д.* Южноприморский шельф Японского моря в позднем плейстоцене и голоцене. Владивосток: ДВНЦ АН СССР, 1983. 128 с.
10. *Флоринский И.В. и др.* Прогнозное почвенное картографирование на основе цифрового моделирования рельефа // Геоинформатика. 2009. № 1. С. 22–32.
11. *Elsner J.B., Tsonis A.A.* Singular Spectrum Analysis: A New Tool in Time Series Analysis. New York: Plenum Press, 1996. 164 p.
12. *Golyandina N.E., Usevich K.D., Florinsky I.V.* Filtering of Digital Terrain Models by Two Dimensional Singular Spectrum Analysis // International Journal of Ecology & Development. 2007. V. 8. № F07. P. 81–94.
13. *Navarra A., Simoncini V.* A Guide to Empirical Orthogonal Functions for Climate Data Analysis. Springer, 2010. 152 p.
14. *Smith W.H.F., Sandwell D.T.* Global sea floor topography from satellite altimetry and ship depth soundings // Science. 1997. V. 277. P. 1956–1962.
15. *Turcotte D.L.* Fractals and chaos in geology and geophysics. New York: Cambridge University Press, 1997. 398 p.
16. URL: <http://www.gdem.aster.ersdac.or.jp>.
17. URL: http://www.gebco.net/data_and_products/gridded_bathymetry_data.
18. URL: <http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>.

Spatiotemporal Analysis of the Ocean Bottom Geomorphology the Peter the Great Gulf (Sea of Japan)

R. A. Korotchenko, A. N. Samchenko, I. O. Yaroshchuk

Digital terrain model of the Peter Great Bay (Japan Sea) is constructed on the basis of ASTER GDEM-satellite data and bathymetrical information from GTOPO1-database and original sources. Two-dimensional Singular Spectrum Analysis (2D-SSA) is used for scale decomposition of terrain relief in the sum of the general, secondary and high-frequency tectonic structures. Selected components have geomorphological interpretation in the light of the Southern Primorye geological information.