

Исследование характеристик мезомасштабной изменчивости Тихого океана в районе Южных Курил и о. Хоккайдо по данным спутниковой альтиметрии

А. А. Романов, А. А. Романов

АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»
Королёв, Московская обл., 141070, Россия
E-mail: romanovaa@tsniimash.ru

Настоящее исследование продолжает цикл работ, направленных на изучение параметров мезомасштабной изменчивости (характерного пространственного и временного масштаба) аномалии высоты морской поверхности дальневосточной акватории Тихого океана по данным спутниковой альтиметрии. Был выбран регион восточнее о-вов Малой Курильской гряды (Кунашира и Итурупа) и юго-восточнее о. Хоккайдо, характеризовавшийся наличием квазистационарных вихревых образований, наблюдавшихся на спутниковых изображениях морской поверхности в различных диапазонах электромагнитного спектра: ближний ультрафиолетовый, видимый, инфракрасный и микроволновый диапазоны. В выбранном регионе на основе данных спутниковой альтиметрии IMMOAD v5.1 (*англ.* Integrated Multi-Mission Ocean Altimeter Data for Climate Research Version 5.1), представляющих собой аномалии высоты морской поверхности за всю историю альтиметрических наблюдений в рамках миссий TOPEX/Poseidon (*англ.* Topographic Experiment/Poseidon) и Jason-1, -2, -3, была построена многомерная функция автокорреляции по пространственному и временному измерению. Для оценки характеристик изменчивости построенная автокорреляционная функция аппроксимировалась многомерной (пространственно-временной) функцией Гаусса. Было показано, что в этом регионе существует ярко выраженная мезомасштабная динамика морской поверхности с характерным пространственным радиусом порядка 90 км и временем существования около 80 сут. Выявленного переноса неоднородностей аномалии высоты морской поверхности, характерного для открытой части Тихого океана, выявить не удалось.

Ключевые слова: спутниковая альтиметрия, статистика, автокорреляционная функция, мезомасштабная изменчивость

Одобрена к печати: 26.02.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-225-234

Введение

Акватория Тихого океана юго-восточнее о. Хоккайдо и южнее о-вов Малой Курильской гряды является регионом активного промысла морских гидробионтов и, следовательно, постоянным объектом различных исследований океанологических характеристик поверхности и водной толщи. Исследование этого региона идёт много лет (Шевченко и др., 2021; Romanov et al., 2001), выявляются квазистационарные вихревые образования, хорошо наблюдаемые на поверхности океана в регионе в различных диапазонах электромагнитного спектра.

Рассматриваемый в работе регион отлично изучен с точки зрения механизмов формирования неоднородностей в различные периоды времени (Кошляков, Белокопытов, 2020; Yasuda, 2003). При этом следует отметить, что исследования направлены на изучение океанографических аспектов сформировавшихся особенностей циркуляции, тогда как статистические характеристики неоднородностей даже в этом относительно популярном среди исследователей регионе изучены достаточно слабо.

В работе (Romanov et al., 2001) проанализированы данные спутниковой альтиметрии, температуры, цвета океана и показано, что в регионе 35° с. ш., 140° в. д. – 45° с. ш., 150° в. д. наблюдается группа квазистационарных вихрей, причём размеры и географическое положение на распределении как температуры и цвета с одной стороны, так и спутниковой альтиметрии с другой стороны хорошо совпадают между собой. При этом непосредственно оценка пространственно-временных характеристик выявленных вихревых образований проведена

не была. Вопрос о характерном времени существования выявленных неоднородностей также остался открытым.

В настоящее время существует массив альтиметрической информации, который охватывает практически 30 лет (с сентября 1992 по март 2022 г.) измерений высоты морской поверхности — IMMOAD v5.1 (*англ.* Integrated Multi-Mission Ocean Altimeter Data for Climate Research Version 5.1), позволяющий исследовать статистические характеристики выявленных неоднородностей на поверхности океана на значительной выборке измерений и оценить характерные размеры и время существования вихревых образований. Указанный массив представляет собой кросс-калиброванный набор аномалий высоты морской поверхности четырёх альтиметрических миссий: TOPEX/Poseidon (*англ.* Topographic Experiment/Poseidon), Jason-1, -2, -3, которые приведены к точкам опорного трека: иными словами, все измерения соотнесены с постоянными географическими точками единого изомаршрутного цикла. Здесь необходимо отметить, что авторами указанного массива информации допущена терминологическая ошибка: то, что определяется как аномалия высоты морской поверхности (*англ.* Sea Surface Height Anomalies — SSHA) является всё же аномалией уровня (*англ.* Sea Level Anomalies — SLA), но в дальнейшем в этой работе для исключения путаницы будем придерживаться новой терминологии.

Исследование статистических характеристик мезомасштабной изменчивости акваторий Мирового океана проводилось и ранее, например, (Jacobs et al., 2001; Kuragano, Kamachi, 2000; Le Traon, 1991; Le Traon et al., 1990). Но в этих исследованиях рассматривалась акватория всего Мирового океана по ограниченной по времени выборке альтиметрической информации только с космического аппарата (КА) TOPEX/Poseidon (Kuragano, Kamachi, 2000) либо нескольких КА (Jacobs et al., 2001) и крайне редко анализировалось состояние небольших акваторий.

Настоящее исследование направлено на оценку статистических характеристик изменчивости в выбранном регионе исследований по данным спутниковой альтиметрии. На основе многолетних рядов альтиметрической информации будет рассчитана пространственно-временная автокорреляционная функция аномалии высоты морской поверхности, которая позволит оценить пространственный и временной радиус затухания функции автокорреляции в e раз (*англ.* e -folding scales), т. е. характерные пространственно-временные масштабы поверхностной изменчивости, а также характерные амплитуды вихревых образований в регионе.

Предварительная обработка данных

Предварительная обработка данных для последующих расчётов была проведена в соответствии с рекомендациями, изложенными в работе (Beckley et al., 2021). Аномалии высоты морской поверхности были выбраны для соответствующего региона исследований, была осуществлена пространственная фильтрация данных и оставлена только та информация, которая попадала в регион с границами вершин: 35° с.ш., 140° в.д. — 45° с.ш., 150° в.д. Кроме того, измерения, относящиеся к акватории Охотского моря, были отдельно отфильтрованы из рассматриваемого массива данных (Jacobs et al., 2001), таким образом, для анализа осталась только та информация, которая характеризует состояние поверхности исключительно в выбранной акватории.

В соответствии с рекомендациями в работе (Kuragano, Kamachi, 2000) были отброшены первые 10 циклов альтиметрических измерений, поскольку ориентация КА TOPEX/Poseidon ещё была недостаточно стабильной и первые циклы информации характеризуются более высокими ошибками измерений, чем последующие. В конечном счёте в рамках настоящего исследования был сформирован самостоятельный набор данных, состоящий из 1 271 630 альтиметрических отсчётов.

Распределение значений аномалии высоты морской поверхности в собранном массиве показывает существенный разброс рассматриваемой величины (*рис. 1*, см. с. 227). Аномалии высоты морской поверхности в регионе варьируются от -255 до 139 см. При этом среднее значение выборки составляет $5,3 \pm 21,7$ см, а медиана — $2,5$ см.

Наличие anomalно больших как отрицательных, так и положительных значений показывает существование потенциальной некорректности при получении значений аномалии особенно в регионах с небольшой глубиной (классические справочники по обработке (Beckley et al., 2021; Benada, 1993) предлагают подобные значения исключать, а отклонение среднего значения (медианы) для аномалии высоты от нуля, возможно, не совсем корректный учёт приливной составляющей (Шевченко, Романов, 2023) при формировании массива IMMOAD v5.1). Для последующего анализа в рассматриваемом массиве были оставлены только те значения, модуль которых был ниже 120 см. Подобная процедура абсолютно не повлияла на статистические характеристики выборки, общее количество точек уменьшилось совершенно незначительно и составило 1 271 060.

Мезомасштабная изменчивость поверхности океана определяется как остаточный процесс после устранения крупномасштабной изменчивости, к которой относятся такие процессы, как Эль-Ниньо/Ла-Нинья, глобальная стерическая аномалия, крупномасштабные бассейновые вихревые образования и т.д. (Jacobs et al., 2001). В настоящем исследовании крупномасштабная изменчивость исключается из выбранного ряда (Jacobs et al., 2001) аналогичным образом. Из каждой точки рассматриваемого массива вычитается значение крупномасштабной изменчивости, которое получается за счёт сглаживания исходного массива информации многомерной функцией Гаусса с характерными параметрами масштабов затухания в e раз: 750 км по долготе, 250 км по широте, 15 дней по времени.

Бесспорно, подобная коррекция данных может влиять на процессы меньшего масштаба. Простейшее моделирование указанного процесса, проведённое в исследовании (Jacobs et al., 2001), показывает, что определённое искажение информации явно присутствует, но значительных величин оно достигает для вихревых образований, начиная с радиуса в 200 км, когда устраняется около 24 % амплитуды, для радиуса 300 км — уже 44 %. Для изменчивости с характерным радиусом 100 км влияние подобной фильтрации незначительно (Jacobs et al., 2001).

После проведённой коррекции массива для региона исследования и устранения крупномасштабной изменчивости была сформирована автокорреляционная функция всех значений аномалии высоты морской поверхности. Для её формирования применяется подход, предложенный в монографии (Гандин, 1963) и использованный в публикации (Романов; Романов, 2024). Существенно позднее исследования (Гандин, 1963) в работе (Jacobs et al., 2001) аналогичный подход получил наименование сгруппированная ковариационная функция (*англ. binned covariance function*).

На первом этапе формируются пары точек для каждого с каждым элементом из анализируемого массива информации, считается взаимное расстояние для отдельной пары, а также произведение элементов. Затем полученные расстояния сравниваются с границами корзин по каждой из рассматриваемых размерностей, в соответствующую для определённого расстояния корзину попадает произведение для исследуемой пары и увеличивается счётчик значений (Гандин, 1963). После завершения процедуры для всех пар точек значения в каждой корзине усредняются.

Аналогично исследованию (Jacobs et al., 2001) формировались корзины сразу по трём измерениям: по времени, долготе и широте. Размер корзины по времени составлял 2,5 дня, пространственное разрешение (размер корзины) по долготе и широте соответствовало 10×10 км. Автокорреляционная функция является симметричной по времени, поэтому

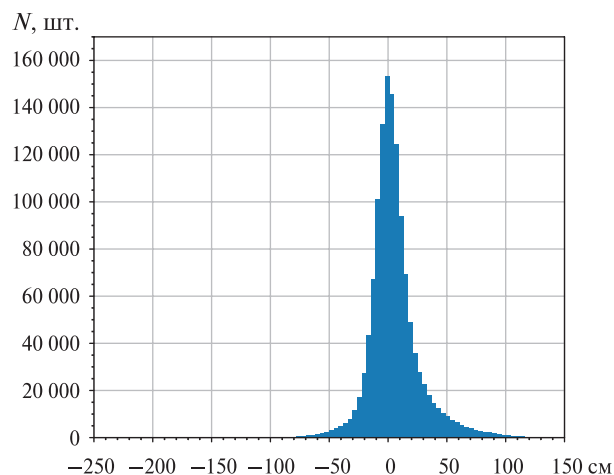


Рис. 1. Распределение аномалий высоты морской поверхности в выбранном регионе

в работе анализируются исключительно положительные значения расстояния: от 0 до 80 сут. По долготе и широте рассматриваемая область ограничена расстояниями от -400 до 400 км.

Необходимо отметить, что значения географической широты и долготы пересчитывались в километры, для чего осуществлялся переход в географическую проекцию Гаусса – Крюгера.

Анализ полученных результатов

Многомерную автокорреляционную функцию представим в виде пространственного распределения на определённые моменты времени, точнее на определённые расстояния (лаги) по времени. На *рис. 2* показано пространственное распределение для лагов 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80 сут.

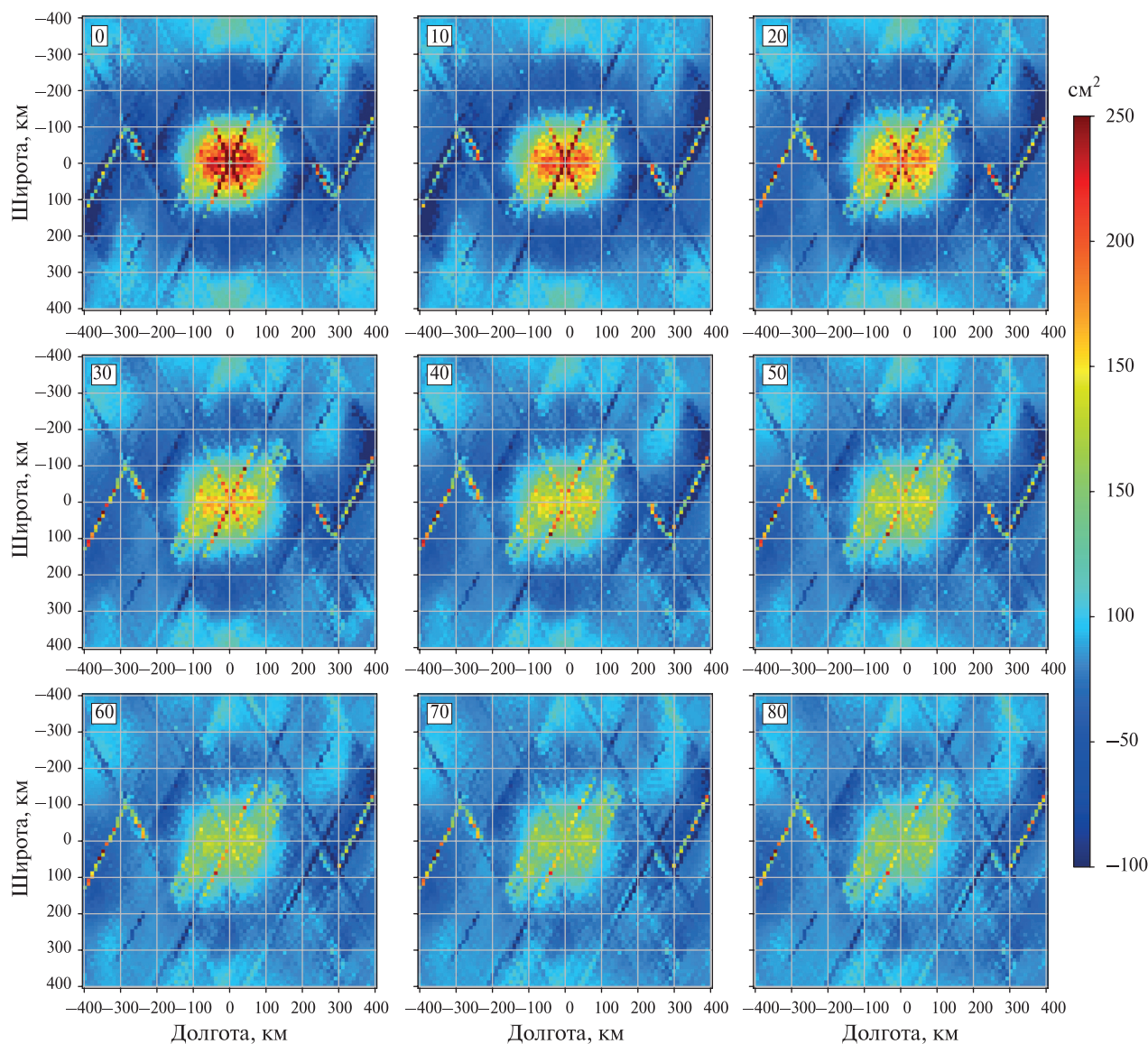


Рис. 2. Рассчитанная автокорреляционная функция в рассматриваемой акватории Тихого океана. Отображается временной лаг от 0 до 80 дней

На пространственном распределении для каждого временного лага чётко выделяется максимум автокорреляционной функции. Для временного и пространственных лагов 0, 0, 0 значение функции автокорреляции определяет дисперсию всей выборки (это утверждение

верно при условии, что среднее значение выборки равно 0, для нашей выборки это практически выполняется), которая составляет около 250 см^2 . Следовательно, характерное значение амплитуды неоднородностей в регионе порядка 16 см.

Характерный пространственный масштаб неоднородности в регионе составляет 200 км по каждой из координат, а характерное время существования — около 80 сут. Плавное уменьшение амплитуды неоднородностей отмечается на протяжении всего периода наблюдений. В отличие от рукава Северо-Экваториального течения (Jacobs et al., 2001) практически отсутствует западный перенос неоднородностей. Если он и есть, то явно очень незначительный, скорость перемещения не превышает единиц миллиметров в сутки.

Необходимо отметить, что на пространственном распределении для каждого временного лага хорошо выделяются артефакты, связанные с характеристиками баллистического построения орбит альтиметрических систем. Максимум информации будет в тех пространственных корзинах, которые соответствуют расстояниям, определяемым геометрическими точками стандартного изомаршрутного цикла КА (рис. 3).

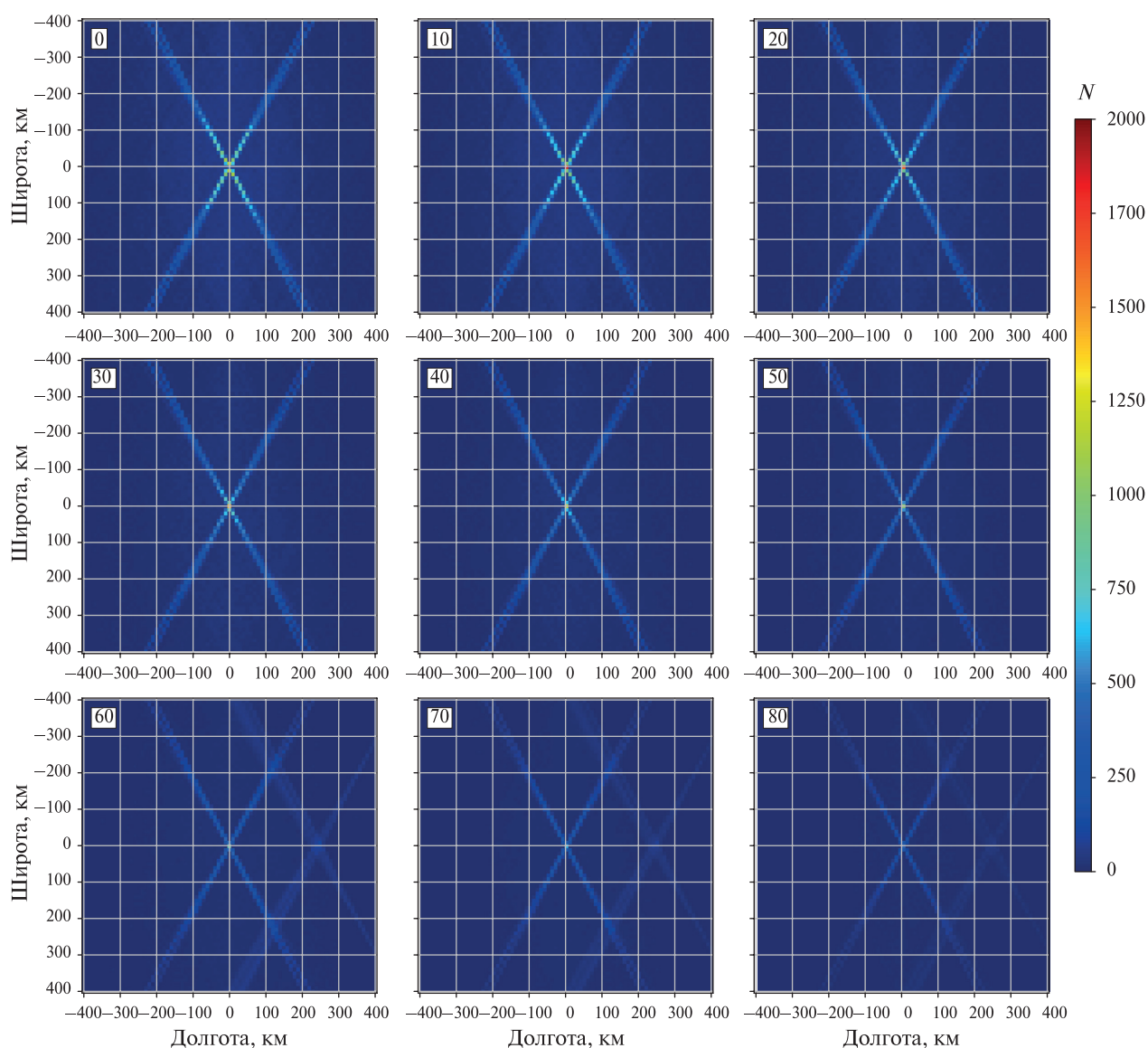


Рис. 3. Пространственное распределение количества точек (N) в каждой пространственной корзине. Отображается временной лаг от 0 до 80 дней

Несмотря на очевидную скудность расстояний, с учётом постоянства геометрического распределения получаемой альтиметрической информации данных для восстановления всех

пространственно-временных элементов автокорреляционной функции с установленным пространственно-временным разрешением достаточно и функция рассчитана без очевидных пропусков.

Для оценки характеристик мезомасштабной изменчивости в выбранном регионе исследований предположим, аналогично работе (Jacobs et al., 2001), что функциональный вид автокорреляционной функции хорошо описывается в виде распределения Гаусса:

$$R(x, y, t) = a^2 \exp \left\{ - \left[\frac{(x - ut)^2}{L_x^2} + \frac{(y - vt)^2}{L_y^2} + \frac{t^2}{T^2} \right] \right\},$$

где x, y, t — лаги по долготе, широте и времени; L_x, L_y, T — масштабы затухания функции в e раз; u, v — скорость перемещения неоднородностей в долготном и широтном направлении соответственно.

Для того чтобы определить неизвестные параметры указанной выше функциональной формы, были проведены аппроксимация полученной многомерной автокорреляционной функции и расчёт указанных выше неизвестных коэффициентов методом наименьших квадратов. Полученная модель в виде пространственного распределения с аналогичным пространственным разрешением и для временных лагов от 0 до 80 сут представлена на *рис. 4*.

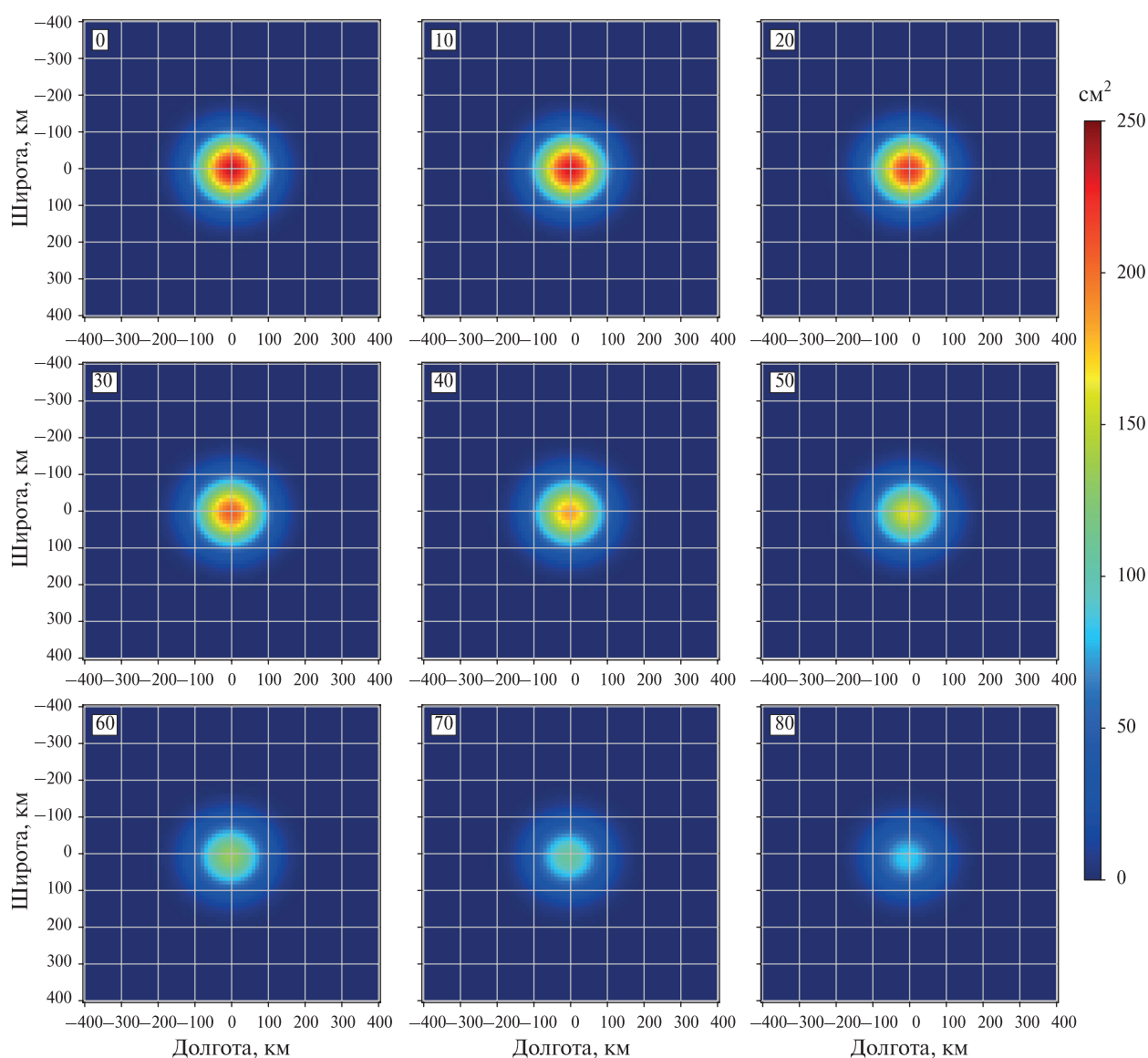


Рис. 4. Пространственное распределение модельной автокорреляционной функции. Отображается временной лаг от 0 до 80 дней

Оценка параметров показала, что преобладающий масштаб неоднородностей в тихоокеанской акватории Южных Курил составляет $L_x = 96$ км, $L_y = 91$ км, при этом время существования T равно 80 дней. Скорость перемещения, как было указано выше, минимальна: $u = -0,1$ см/день, $v = 0,1$ см/день. Характерная амплитуда неоднородностей составляет порядка 16 см.

К большому сожалению, сравнить полученные параметры функции с результатами предыдущих исследований достаточно сложно: в публикации (Kuragano, Kamachi, 2000) численных значений модели для региона, рассматриваемого в настоящей работе, не приведено — были даны данные исключительно для крупных акваторий. Что касается статьи (Jacobs et al., 2001), то анализ графического распределения соответствующих параметров модели показывает, что полученные результаты достаточно близки: скорость распространения неоднородностей в исследовании (Jacobs et al., 2001) в рассматриваемом нами регионе отсутствует, а масштабы затухания в e раз по долготе, широте и времени следующие: ~ 80 км, ~ 80 км и ~ 60 дней. Амплитуда функции в работе (Jacobs et al., 2001) составляет 10–15 см, что также хорошо соответствует полученным нами значениям.

Достаточно неплохое совпадение полученных параметров тем более удивительно, что в исследовании (Jacobs et al., 2001) использовались данные сразу нескольких альтиметрических миссий, т. е. данных для анализа было существенно больше с точки зрения геометрической заполняемости регионов исследования. Возможно, что хорошее соответствие параметров изменчивости удалось получить вследствие очень длинного ряда (почти 30-летнего) альтиметрических наблюдений, использованного в настоящей работе.

Интересно, что достаточно хорошо совпадают и параметры качества описания поверхностной мезомасштабной изменчивости функцией Гаусса в рассматриваемом регионе. В публикации (Jacobs et al., 2001) для изучаемого нами региона приведена оценка 0,3–0,4 и констатируется, что соответствие реальной и модельной функции улучшается для открытых бассейнов и ухудшается к береговой линии. В нашем исследовании коэффициент детерминации составил 0,38.

Заключение

Спутниковая альтиметрия является значимым инструментом для получения важной информации о характеристиках циркуляции водных масс в исследуемых регионах, особенно если для анализа доступны массивы данных за значительные промежутки времени. В этом смысле массив IMMOAD v5.1 является абсолютно уникальным набором информации для исследования изменчивости циркуляции водных масс во всех акваториях Мирового океана.

Выбранная часть акватории Тихого океана юго-восточнее о. Хоккайдо и южнее Южных Курил является очень интересным с динамической точки зрения регионом, демонстрирующим устойчивые показатели мезомасштабной изменчивости. С учётом того, что время существования вихревых образований в регионе исследования составляет порядка 80 сут, действительно становится понятным, почему наблюдается подобное хорошее соответствие карт аномалий высоты морской поверхности (TOPEX/Poseidon) и карт температуры поверхности океана, а также карт цвета океана, полученных в ИК- и ближнем УФ-диапазонах (Romanov et al., 2001). При длительности изомаршрутного цикла КА TOPEX/Poseidon порядка 10 дней вихревые структуры соответствующих геометрических размеров ($\sim 180 \times 180$ км) будут хорошо захватываться даже измерениями в надир на этих широтах. Очень интересным фактом является отсутствие выраженного западного переноса неоднородностей, характерного для Северо-Экваториального течения, а также явной асимметрии автокорреляционной функции, которую можно предположить из работы (Kuragano, Kamachi, 2000).

Несомненно, для региональных исследований данные IMMOAD v5.1 требуют некоторой вторичной обработки (Шевченко, Романов, 2023). Для начала следует очень внимательно относиться к фильтрации «сбойной» информации, поскольку в прибрежных регионах присутствуют точки с аномально высокими по модулю аномалиями. Кроме того, по результатам

как предыдущих исследований (Романов, Романов, 2023), так и настоящей работы видно, что среднее значение по выборке отлично от нулевого, что, вообще говоря, не позволяет использовать простую реализацию методов оптимальной интерполяции при восстановлении непрерывного поля аномалий высоты морской поверхности, потребуется некоторое усложнение алгоритма обработки (Гандин, 1963).

Можно констатировать, что использование большой выборки альтиметрической информации одного КА (в нашем случае это около 30 лет непрерывных измерений) позволяет хорошо описывать характеристики мезомасштабной изменчивости в регионе. Показано соответствие полученных значений результатам, представленным в предыдущих исследованиях, причём в работе (Jacobs et al., 2001) для восстановления многомерной автокорреляционной функции используется информация трёх альтиметрических КА. Невысокое значение коэффициента детерминации определяется несколькими факторами (Jacobs et al., 2001): во-первых, функция Гаусса не описывает отрицательные значения корреляционной функции; во-вторых, очевидно вносятся искажения при устранении крупномасштабной изменчивости. Первый фактор принципиальным не является, в случаях исследования изменчивости нас интересует сегмент автокорреляционной функции до первого пересечения функции с осью абсцисс и ординат. Второй фактор, несомненно, существенно сложнее, вполне вероятно, что для исследований изменчивости прибрежных регионов следует использовать более сложную модель крупномасштабной изменчивости.

Несмотря на это, методические подходы, предложенные в предыдущих исследованиях (Гандин, 1963), а также усилия по изучению мезомасштабной изменчивости акваторий Мирового океана (Jacobs et al., 2001; Kuragano, Kamachi, 2000) открывают путь к более детальному исследованию бассейнов и закрытых акваторий, наиболее значимым и интересным из которых является дальневосточный регион Российской Федерации и, в частности, акватория Охотского моря.

Литература

1. Гандин Л. С. Объективный анализ метеорологических полей. Л.: Гидрометеоролог. изд-во, 1963. 288 с.
2. Кошляков М. Н., Белокопытов В. Н. Синоптические вихри открытого океана: обзор экспериментальных исследований // Морской гидрофиз. журн. 2020. Т. 36. № 6. С. 613–627. DOI: 10.22449/0233-7584-2020-6-613-627.
3. Романов А. А., Романов А. А. Особенности циркуляции северо-западной части Тихого океана по данным спутниковой альтиметрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 5. С. 232–245. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-232-245.
4. Романов А. А., Романов А. А. Отдельные свойства пространственной функции корреляции аномалий высоты морской поверхности по данным спутниковой альтиметрии в дальневосточном регионе // Космонавтика и ракетостроение. 2024. № 3. С. 89–97.
5. Шевченко Г. В., Романов А. А. О значении приливной коррекции для расчёта средних поверхностей уровня моря по данным спутниковой альтиметрии IMMOAD SSHA // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2023. Т. 20. № 6. С. 80–91. DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-80-91.
6. Шевченко Г. В., Цой А. Т., Частиков В. Н. Характеристики антициклонического вихря, сформировавшегося у тихоокеанского побережья Южных Курил весной 1999 г. // Океанол. исслед. 2021. Т. 49. № 2. С. 5–20. DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2021.49(2).1.
7. Beckley B., Ray R., Zelensky N. et al. Integrated multi-mission ocean altimeter data for climate research TOPEX/Poseidon, Jason-1, 2, and 3. User's handbook. Version 5.1. California Institute of Technology, 2021. 47 p. DOI: 10.5067/ALTCY-TJA51.
8. Benada R. PO.DAAC merged GDR (T/P) users handbook. Rep. JPL D-11007. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 1993. 111 p.
9. Jacobs G. A., Barron C. N., Rhodes R. C. Mesoscale characteristics // J. Geophysical Research: Oceans. 2001. V. 106. Iss. C9. P. 19581–19595. <https://doi.org/10.1029/2000JC000669>.
10. Kuragano N., Kamachi M. Global statistical space-time scales of oceanic variability estimated from the TOPEX/Poseidon altimeter data // J. Geophysical Research: Oceans. 2000. V. 105. Iss. C1. P. 955–974. DOI: 10.1029/1999JC900247.

11. *Le Traon P. Y.* Time scales of mesoscale variability and their relationship with space scales in the North Atlantic // *J. Marine Research*. 1991. V. 49. P. 467–492. DOI: 10.1357/002224091784995828.
12. *Le Traon P. Y., Rouquet M. C., Boissier C.* Space scales of mesoscale variability in the North Atlantic as deduced from Geosat data // *J. Geophysical Research: Oceans*. 1990. V. 95. Iss. C11. P. 20267–20285. <https://doi.org/10.1029/JC095iC11p20267>.
13. *Romanov A. A., Fefilov Y. V., Romanov A. A.* Multi-satellite oceanographic monitoring in Far East Region as a part of monitoring, control and surveillance system for Russian fisheries fleet: Preliminary results // *Proc. 4th Intern. Workshop on Ocean Color*. 2001. P. 225–234.
14. *Yasuda I.* Hydrographic structure and variability in the Kuroshio-Oyashio Transition Area // *J. Oceanography*. 2003. V. 59. P. 389–402. DOI: 10.1023/A:1025580313836.

Study of characteristics of mesoscale variability of the Pacific Ocean in the area of South Kuril and Hokkaido islands based on satellite altimetry data

A. A. Romanov, A. A. Romanov

*AO Central Research Institute for Machine Building
Korolev, Moscow Region 141070, Russia
E-mail: romanovaa@tsniimash.ru*

This study continues a series of works focusing on parameters of mesoscale variability (characteristic spatial and temporal scales) of sea surface height anomalies in the Far Eastern Pacific Ocean derived from satellite altimetry data. A region was chosen east of the islands of the Small Kuril Ridge (Kunashir and Iturup) and southeast of the Hokkaido Island, characterized by the presence of quasi-stationary vortex formations observed in satellite images of the sea surface in various ranges of the electromagnetic spectrum: near UV, visible, IR and microwave ranges. In the selected region, based on IMMOAD (Integrated Multi-Mission Ocean Altimeter Data for Climate Research) v5.1 satellite altimetry data, which represent sea surface height anomalies over the entire history of altimetry observations within the TOPEX/Poseidon (Topographic Experiment/Poseidon) and Jason-1, -2, -3 missions, a multidimensional autocorrelation function was constructed in spatial and temporal dimensions. To assess the characteristics of variability, the constructed autocorrelation function was approximated by a multidimensional (spatial-temporal) Gaussian function. It was shown that in this region there is a pronounced mesoscale dynamics of the sea surface with characteristic spatial radii of about 90 km and a lifetime of about 80 days. No pronounced transfer of sea surface height anomaly heterogeneities, characteristic of the open part of the Pacific Ocean, could be identified.

Keywords: satellite altimetry, statistics, autocorrelation function, mesoscale variability

Accepted: 26.02.2025

DOI: 10.21046/2070-7401-2025-22-3-225-234

References

1. Gandin L. S., *Ob"ektivnyi analiz meteorologicheskikh polei* (Objective analysis of the meteorology fields), Leningrad: Gidrometeorologicheskoe izd., 1963, 288 p. (in Russian).
2. Koshlyakov M. N., Belokopytov V. N., Mesoscale eddies in the open ocean: Review of experimental investigations, *Physical Oceanography*, 2020, V. 27, No. 6, pp. 559–572, DOI: 10.22449/1573-160X-2020-6-559-572.
3. Romanov A. A., Romanov A. A., Features of the circulation of the northwestern Pacific Ocean according to satellite altimetry data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 5, pp. 232–245 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-232-245.
4. Romanov A. A., Romanov A. A., Selected properties of the spatial correlation function of sea surface height anomalies based on satellite altimetry data in the Far Eastern Region, *Kosmonavtika i raketostroyeniye*, 2024, No. 3, pp. 89–97 (in Russian).

5. Shevchenko G. V., Romanov A. A., On the importance of tidal correction for calculation of mean sea level surfaces from IMMOAD SSHA satellite altimetry data, *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2023, V. 20, No. 6, pp. 80–91 (in Russian), DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-6-80-91.
6. Shevchenko G. V., Tsoy A. T., Chastikov V. N., Characteristics of an anticyclonic eddy formed at the Pacific coast of the Southern Kuril Islands in the spring of 1999, *J. Oceanological Research*, 2021, V. 49, No. 2, pp. 5–20 (in Russian), DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2021.49(2).1.
7. Beckley B., Ray R., Zelensky N. et al., *Integrated multi-mission ocean altimeter data for climate research TOPEX/Poseidon, Jason-1, 2, and 3. User's handbook. Version 5.1*, California Institute of Technology, 2021, 47 p., DOI: 10.5067/ALTCY-TJA51.
8. Benada R., *PO.DAAC merged GDR (T/P) users handbook*, Rep. JPL D-11007, Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 1993, 111 p.
9. Jacobs G. A., Barron C. N., Rhodes R. C., Mesoscale characteristics, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2001, V. 106, Iss. C9, pp. 19581–19595, <https://doi.org/10.1029/2000JC000669>.
10. Kuragano N., Kamachi M., Global statistical space-time scales of oceanic variability estimated from the TOPEX/Poseidon altimeter data, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2000, V. 105, Iss. C1, pp. 955–974, DOI: 10.1029/1999JC900247.
11. Le Traon P. Y., Time scales of mesoscale variability and their relationship with space scales in the North Atlantic, *J. Marine Research*, 1991, V. 49, pp. 467–492, DOI: 10.1357/002224091784995828.
12. Le Traon P. Y., Rouquet M. C., Boissier C., Spatial scales of mesoscale variability in the North Atlantic as deduced from Geosat data, *J. Geophysical Research: Oceans*, 1990, V. 95, Iss. C11, pp. 20267–20285, <https://doi.org/10.1029/JC095iC11p20267>.
13. Romanov A. A., Fefilov Y. V., Romanov A. A., Multi-satellite oceanographic monitoring in Far East Region as a part of monitoring, control and surveillance system for Russian fisheries fleet: Preliminary results, *Proc. 4th Intern. Workshop on Ocean Color*, 2001, pp. 225–234.
14. Yasuda I., Hydrographic structure and variability in the Kuroshio-Oyashio Transition Area, *J. Oceanography*, 2003, V. 59, pp. 389–402, DOI: 10.1023/A:1025580313836.