

О точности устранения приливной компоненты из данных спутниковой альтиметрии IMMOAD SSHA

Г. В. Шевченко^{1,2}, А. А. Романов³, А. Т. Цой¹

¹ Сахалинский филиал Всероссийского научно-исследовательского института рыбного хозяйства и океанографии, Южно-Сахалинск, 693023, Россия
E-mail: Shevchenko_zhora@mail.ru

² Институт морской геологии и геофизики ДВО РАН
Южно-Сахалинск, 693023, Россия

³ АО «Центральный научно-исследовательский институт машиностроения»
Королёв, Московская обл., 141070, Россия

Массив аномалий уровенной поверхности, сформированный по данным четырёх искусственных спутников Земли (IMMOAD SSHA) за 1992–2022 гг., протестирован на качество устранения приливной компоненты. Процедура тестирования выполнялась прямым расчётом амплитуды и фазы восьми главных приливных волн (четырёх суточного диапазона и четырёх полусуточного) в каждой точке подспутниковых треков. Выявлено, что в ряде районов (прежде всего в прибрежных акваториях Охотского моря и в зоне влияния тёплого течения Куроисио) амплитуда нескольких волн имеет величину в несколько сантиметров, что подтверждает недостаточную точность устранения приливов в тестируемом массиве. Средние значения приливных рядов также немалы и различаются на разных участках изучаемой акватории. Это указывает на то, что не устранённый в достаточной степени прилив вносит в массив ложные постоянные течения, наиболее значительные в районе влияния тёплого течения Куроисио. В некоторых точках области из-за специфической дискретности рядов спутниковой альтиметрии остаточный прилив создаёт ложные годовые и полугодовые вариации, что может искажать картину сезонных колебаний при использовании массива для их изучения.

Ключевые слова: спутниковая альтиметрия, уровень моря, аномалия, прилив, амплитуда, фаза, северо-западная часть Тихого океана, дальневосточные моря

Одобрена к печати: 11.08.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-20-29

Введение

Массив данных об аномалиях высоты уровенной поверхности по данным спутниковой альтиметрии, сформированный по измерениям серии искусственных спутников Земли IMMOAD SSHA (*англ.* Integrated Multi-Mission Ocean Altimeter Datasets Sea surface height anomalies), является популярной основой для изучения различных динамических процессов в океане — прежде всего для оценки скорости и направления течений, а также определения параметров мезомасштабных вихрей. Считается, что ошибка этих данных в прибрежной 20-километровой зоне составляет 1–2 см, а в открытых областях океана и морей — порядка 0,8 см. Заявленная точность требует прежде всего высокой надёжности модели приливов, которая используется для их расчёта, и устранения из исходных данных так называемых приливных поправок (*англ.* tidal corrections). Этому вопросу создателями массива уделялось значительное внимание на всех этапах его формирования (Beckley et al., 2017, 2021; Benada, 1997). Основная поправка формируется при помощи модели Global Ocean Tide (GOT, версии v4.8 и v4.10 для различных искусственных спутников Земли (ИСЗ)), при расчётах ассимилируются полученные ранее данные спутниковой альтиметрии и ряда береговых станций (мареографы на российском побережье не учитываются). Модель включает суточные и более короткопериодные составляющие, вклад гармоник с периодами более суток определяется по методике (Ray, Erofeeva, 2014). Помимо этого, учитывается влияние внутренних приливных волн, земного прилива, деформации земной коры под действием океанских приливов, хотя вклад некоторых составляющих, вообще говоря, незначителен (Cartwright, Edden, 1973; Zaron, 2019).

Такие существенные усилия связаны с тем обстоятельством, что даже небольшие ошибки при элиминировании приливной компоненты могут привести к существенным искажениям непериодической составляющей, из которой, собственно, рассчитывается циркуляция вод и характеристики синоптических рингов. Тем не менее имеются некоторые сомнения в точности модели GOT для северо-западной части Тихого океана и дальневосточных морей, прежде всего Охотского. В значительной мере это обусловлено большой величиной приливов и сложным характером рельефа дна и топографии береговой черты в этом бассейне. Многие созданные ранее численные модели приливов для этого моря были недостаточно надёжными; в частности, в них не получалась амфидромия полусуточных волн M2 и S2 у северо-восточного берега о. Сахалин (в качестве примера можно привести известную работу (Choi et al., 1999)).

По этой причине для Охотского моря около двадцати лет назад авторами настоящей работы была разработана методика прямого расчёта приливов в точках подспутниковых треков ИСЗ Torex/Poseidon (TP), что позволило построить карту приливов для его акватории на основе спутниковых измерений, не прибегая к численному моделированию (Шевченко, Романов, 2004).

В настоящем исследовании предпринята попытка оценить качество фильтрации приливов при формировании массива данных SSHA для северо-западной части Тихого океана и дальневосточных морей. Эта задача решалась применением методики прямого расчёта приливов в точках подспутниковых треков, когда в качестве исходных данных задавался массив SSHA. Если в данной точке имеется остаточное влияние приливов, то при таком расчёте будет получена амплитуда главных волн заметной величины. Можно считать качество фильтрации достаточным, если амплитуда главных волн не превышает 1 см. Если она больше этой величины, то заявленная точность заведомо не обеспечивается, вносимая периодическими колебаниями уровня погрешность существенна и необходимо вычистить из анализируемых рядов присутствующую в них остаточную приливную компоненту. Выполненная таким образом дополнительная элиминация приливов позволяет получить более надёжный массив SSHA, что открывает возможность в будущем использовать его для решения различных задач с большей эффективностью.

Материалы и методы исследования

Исходными данными для настоящего исследования послужили материалы спутниковых альтиметрических наблюдений в виде значений аномалии уровенной поверхности IMMOAD v5.1 SSHA, взятые с сайта <http://podaac.jpl.nasa.gov>. Область исследования охватывала северо-западную часть Тихого океана (СЗТО) и дальневосточных морей, она была ограничена координатами 35–66° с. ш. и 135–180° в. д. Всего в ней было около 17 500 точек, лежащих на подспутниковых треках, по которым изначально был запущен ИСЗ Torex/Poseidon (рис. 1, см. с. 22), а позднее — ИСЗ Jason-1, -2 и -3. Материалы альтиметрических измерений, полученные с указанных спутников, и составили анализируемый на качество устранения приливной компоненты массив SSHA. Период наблюдений составил 30,5 лет (с сентября 1992 по март 2022 г.), ожидаемая длина ряда с учётом продолжительности изомаршрутного цикла около 10 сут при отсутствии пропусков должна была составлять 1098 значений, фактическая максимальная длина ряда составила 1072 отсчёта. В некоторых точках ряды были существенно короче, прежде всего в районах, расположенных вблизи берега в северной части изучаемой области, где большое число пропусков связано с влиянием ледяного покрова. Имели место также пропуски по техническим причинам, но их доля была сравнительно невелика.

Вычисление амплитуды и фазы главных приливных волн (рассчитывались параметры восьми волн: четырёх суточного диапазона — Q1, O1, K1, P1 и четырёх полусуточного диапазона — N2, M2, S2 K2) проводилось методом наименьших квадратов, астрономические поправки на амплитуду и фазу рассчитывались для каждого отсчёта отдельно. Подробное описание

методики расчёта приведено в публикации (Шевченко, Романов, 2004), поэтому не будем на ней подробно останавливаться. Как показано в этой работе, данный набор приливных гармоник уверенно определяется при длине ряда не менее 120 значений, поэтому точки, в которых длина ряда была меньше, из дальнейших расчётов исключались. Всего таких точек было 140, что менее 1 % от общего массива, эти потери представлялись несущественными.

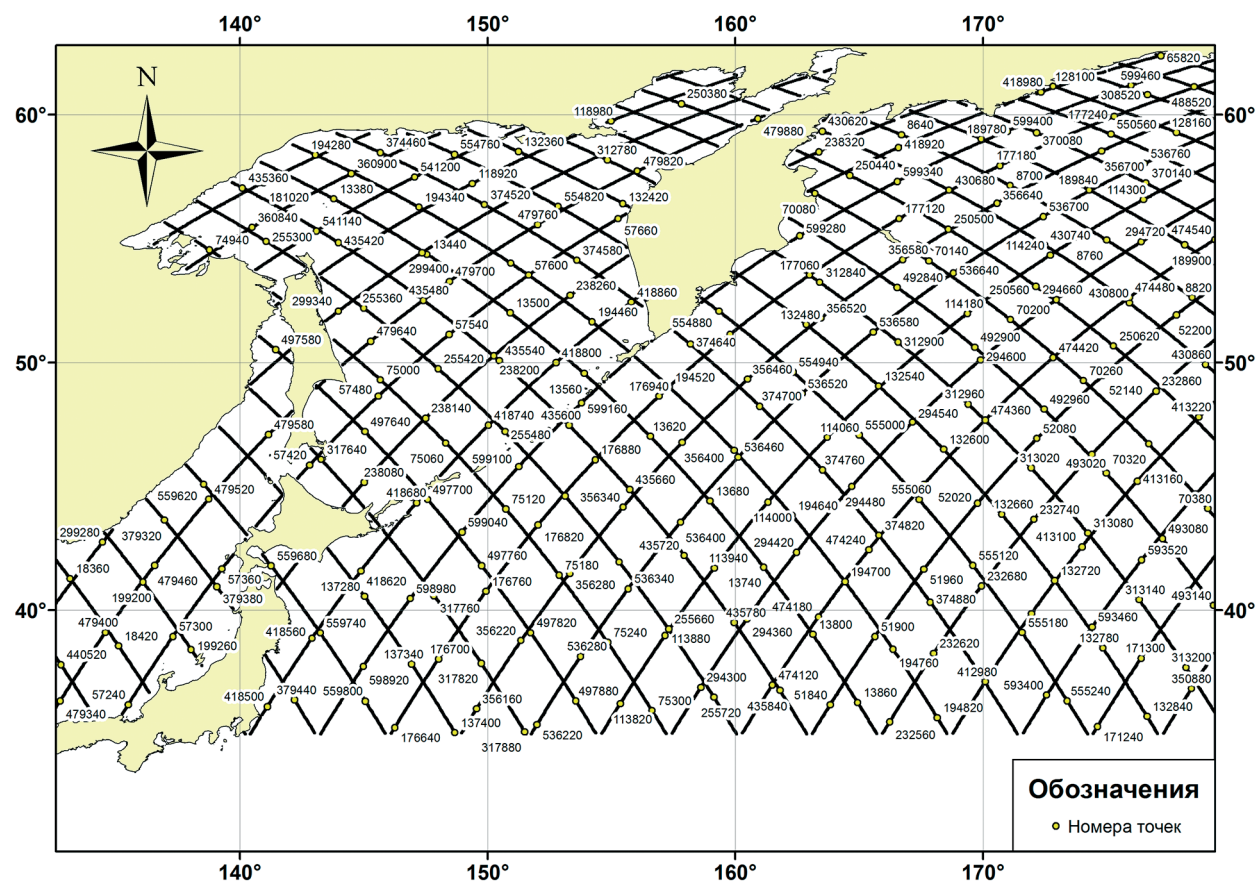


Рис. 1. Карта подспутниковых треков, в точках которых была сформирована база данных SSHA

Вычисления производились для каждой точки массива отдельно, помимо параметров главных приливных составляющих вычислялись максимальные и минимальные значения предвычисленного приливного ряда, которые можно рассматривать как наибольшие величины поправок к исходным значениям SSHA, полученных в рамках предлагаемого подхода (их можно рассматривать как наибольшие по величине положительные и отрицательные погрешности, вносимые остаточным приливом). Амплитуда основных волн и экстремальные значения предвычисленных приливных рядов использовались для оценки наличия остаточного влияния приливов в массиве SSHA на различных участках изучаемой акватории.

Рассчитывалось также среднее значение приливного ряда. Отметим, что, учитывая дискретность анализируемого ряда и различное количество данных, приходящихся на положительную и отрицательную фазу прилива, эта величина в большинстве случаев заметно отличалась от нуля. Такого не бывает при обычном анализе ежечасных рядов уровня моря, когда на фазы прилива и отлива приходится одинаковое количество данных и среднее значение равно нулю. Но для данных спутниковой альтиметрии с дискретностью данных 10 сут такая проблема возникает, этот аспект требует серьёзного внимания, так как искажение средних значений сказывается на качестве расчёта поля течений (как стационарных, так и формирующихся на отдельных интервалах времени) на различных участках изучаемого региона. Этот вопрос также рассматривается в настоящей работе.

Результаты и обсуждение

На *рис. 2* (см. с. 24) представлено пространственное распределение амплитуды главной полусуточной волны M2. В центральных районах дальневосточных морей и СЗТО её значения не превышают 1, что позволяет оценить качество устранения данной приливной волны при создании массива SSHA как достаточно высокое. При этом не так мало районов, где значения амплитуды были высокими. Это прежде всего прибрежные акватории на северо-западе и северо-востоке Охотского моря (заливы Удская гуда, Тугурский, Ульбанский и северо-восточная часть зал. Шелихова, Гижигинская и Пенжинская губы), где значения параметра превышают 10 см. Близкие значения получены также в Амурском лимане, выделяются локальные области в северной части Карагинского зал. Берингова моря, в районе Северных Курил, в Тауйской губе и т. д. Однако и в открытом океане можно обнаружить районы, где имеет место недостаточная точность устранения главной полусуточной составляющей прилива. Это относится главным образом к зоне влияния тёплого течения Куроисио вблизи южной границы изучаемого региона.

Пространственное распределение амплитуды главной суточной волны K1 (*рис. 3*, см. с. 24) в целом сходно с рассмотренным выше для полусуточной составляющей. Главным образом это связано с очень высокими её значениями в заливах в северо-восточной и северо-западной части Охотского моря, особенно в зал. Шелихова (более 50 см).

Но имеются также существенные различия в пространственном распределении амплитуды главных составляющих суточных и полусуточных приливов. Прежде всего отметим высокие значения вблизи Ямских о-вов, в северной части Карагинского зал. и в Беринговом море между мысами Наварин и Олюторский. В Амурском лимане амплитуда главной суточной волны меньше, чем у M2, но обратная картина наблюдается на северо-восточном шельфе о. Сахалин. Аналогичная ситуация и в районе Курильской гряды — если существенные амплитуды M2 были отмечены в северной её части, то у K1 они здесь меньше, а на остальных участках больше. Несколько более высокие значения амплитуды, чем у полусуточной волны, отмечены в южной части рассматриваемой области, в зоне влияния тёплого течения Куроисио.

На *рис. 4* и *5* (см. с. 25) представлено пространственное распределение экстремальных значений предвычисленных для каждой точки приливных рядов. Эти величины характеризуют максимальные погрешности (в положительную и в отрицательную сторону, на обоих рисунках наибольшие отклонения от среднего отмечены красным цветом) в рядах SSHA, связанные с недостаточно надёжной фильтрацией приливов.

Отметим, что в ряде точек минимумы приливного ряда имеют положительные значения (отрицательных максимумов немного, но они также имеют место). Это обусловлено упомянутой выше особенностью альтиметрических данных, когда вследствие специфической дискретности анализируемых рядов имеет место ненулевое среднее значение (чаще положительное и в некоторых точках существенной величины). Эта важная особенность более подробно обсуждается ниже.

Из приведённых рисунков видно, что на достаточно больших по площади акваториях погрешности, вносимые приливами в массив SSHA, могут превышать 10 см и иметь как положительный, так и отрицательный знак. Это относится прежде всего к значительной части прибрежных районов Охотского и Берингова морей (менее заметен этот эффект в Японском море), прилегающих к Курильской и, в меньшей степени, Алеутской островным грядам, а также ряду областей в открытом океане, прежде всего к зоне влияния тёплого течения Куроисио.

Рассмотрим для примера несколько рядов в различных точках изучаемой акватории, в которых роль приливной составляющей неодинакова. На *рис. 6* (см. с. 26) представлены исходный (из массива SSHA) и предвычисленный приливной ряды уровня моря в трёх различных точках изучаемой области с незначительным (114000), умеренным (137400) и существенным (128100) вкладом приливной составляющей (все точки отмечены на *рис. 1*). Несложно представить, как выглядят остаточные (непериодические) вариации, получаемые вычитанием прилива из исходных значений высоты аномалий уровенной поверхности.

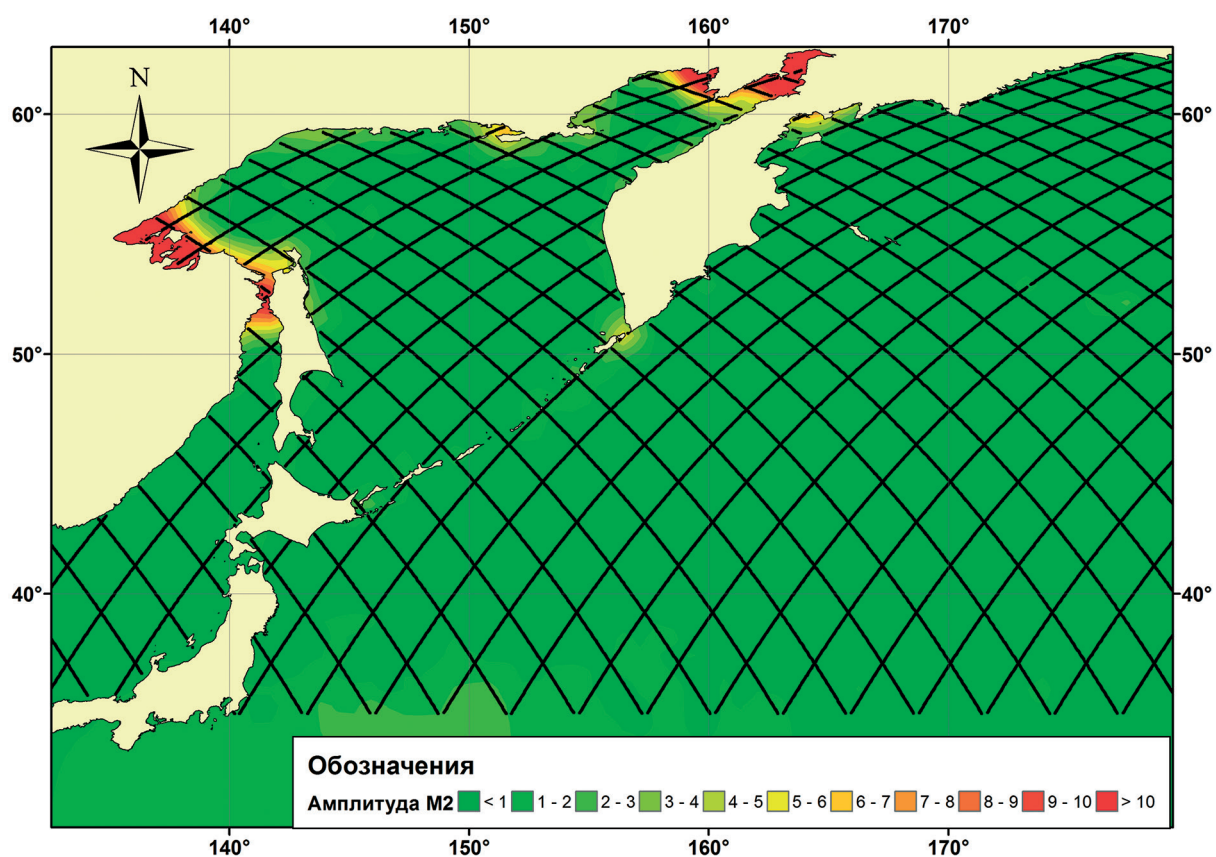


Рис. 2. Пространственное распределение амплитуды главной полусуточной волны M2 (в см)

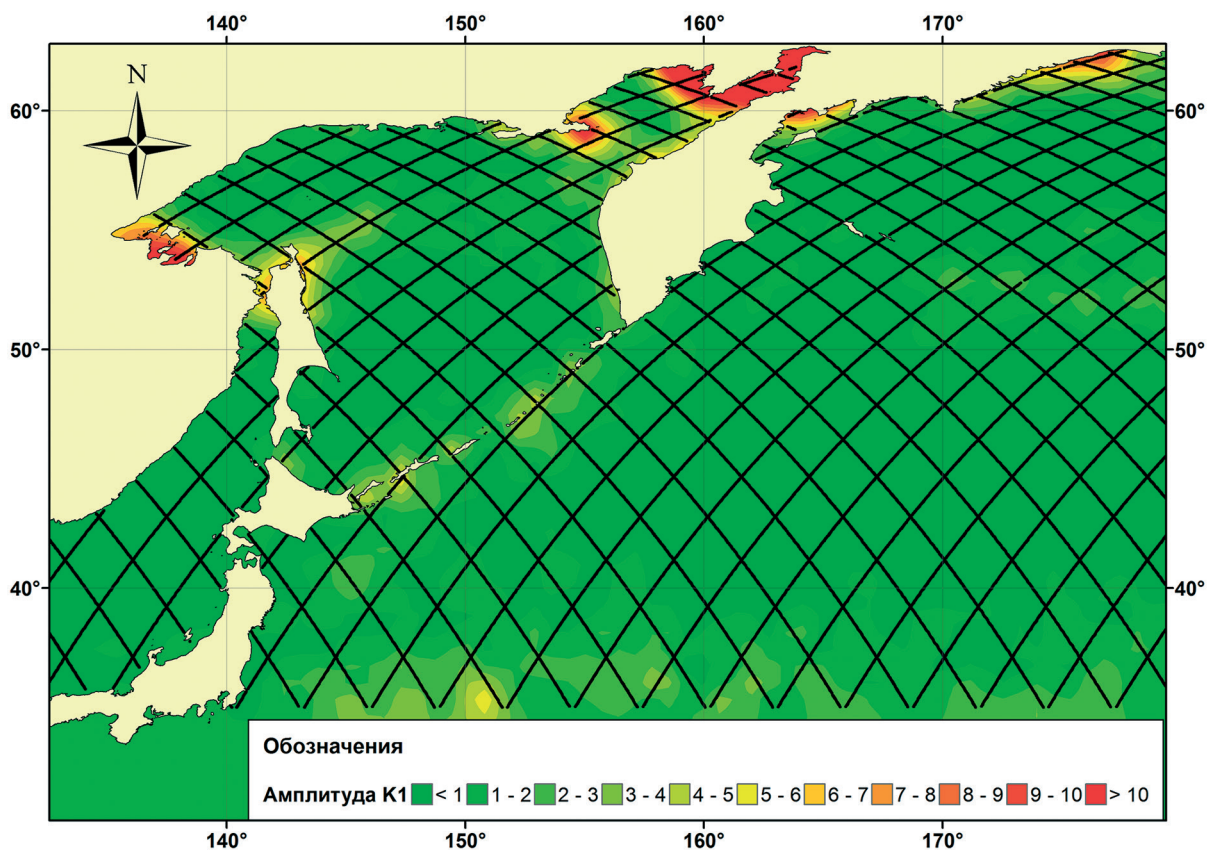


Рис. 3. Пространственное распределение амплитуды главной суточной волны K1 (в см)

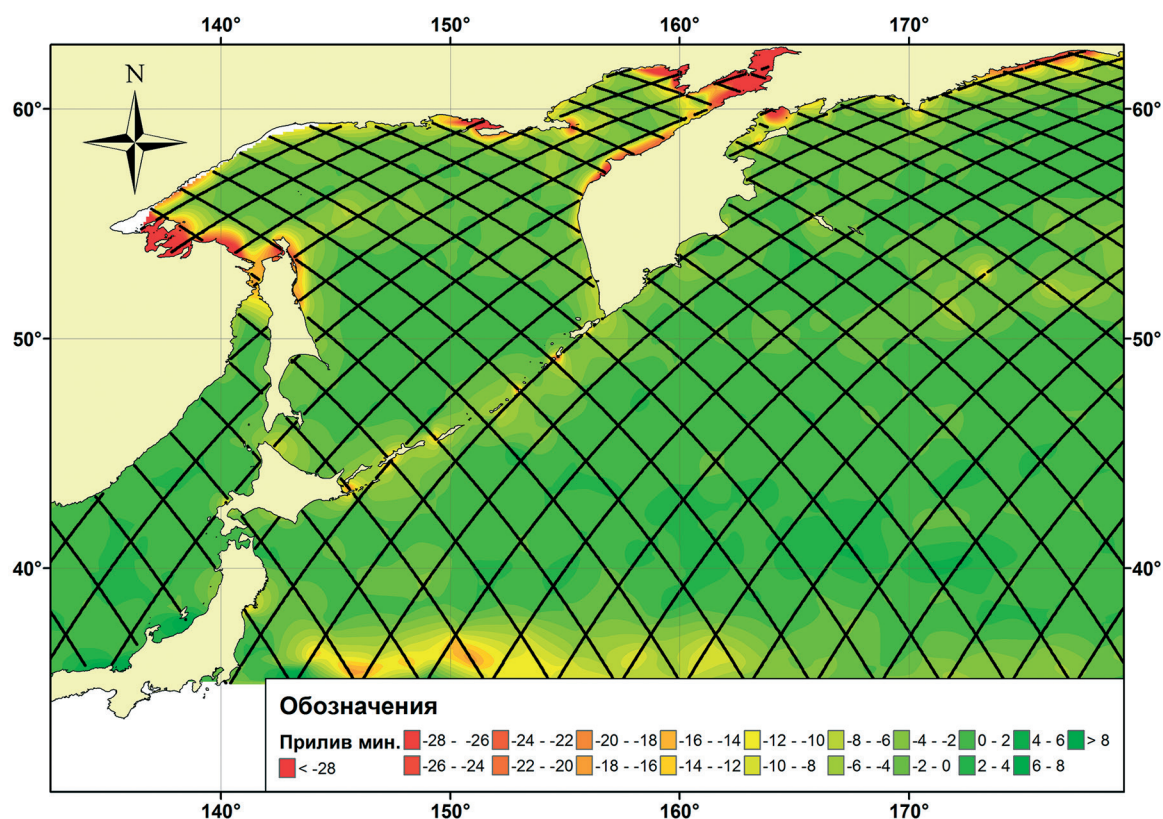


Рис. 4. Пространственное распределение минимального значения приливного ряда (в см), предвычисленного в каждой точке подспутникового трека

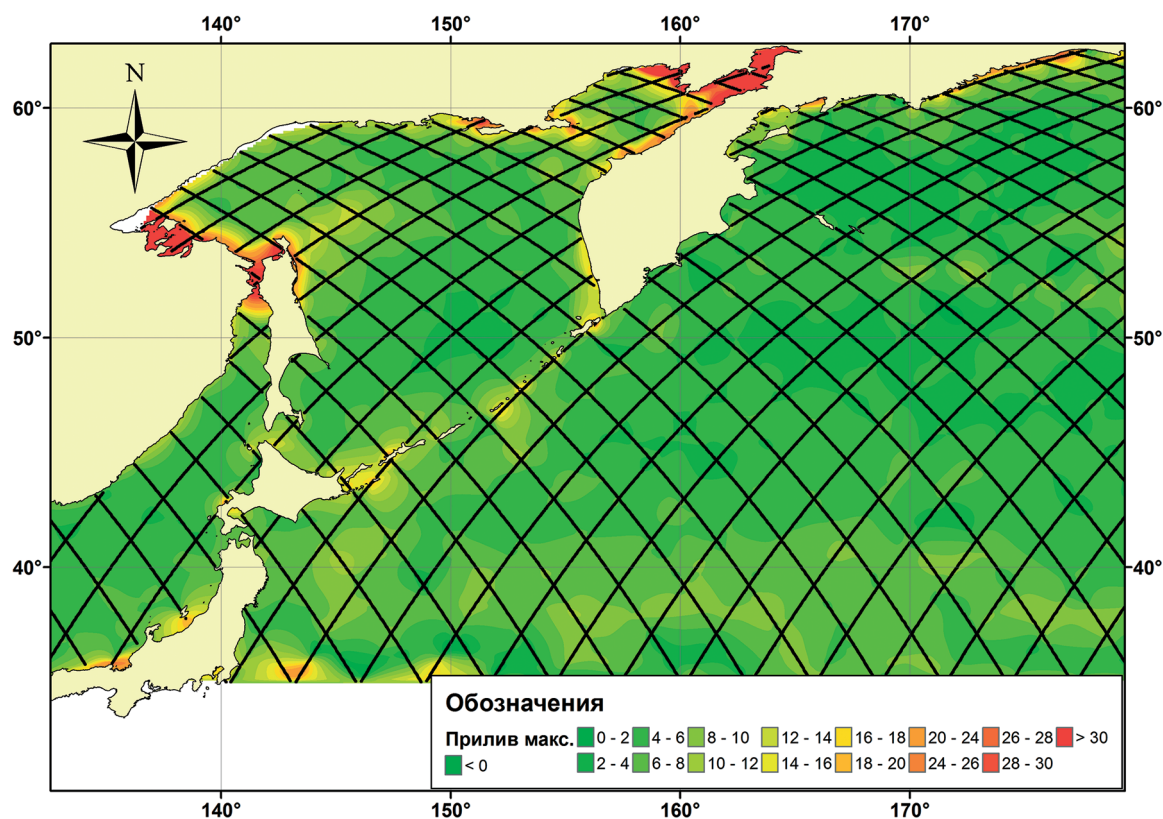


Рис. 5. Пространственное распределение максимального значения приливного ряда (в см), предвычисленного в каждой точке подспутникового трека

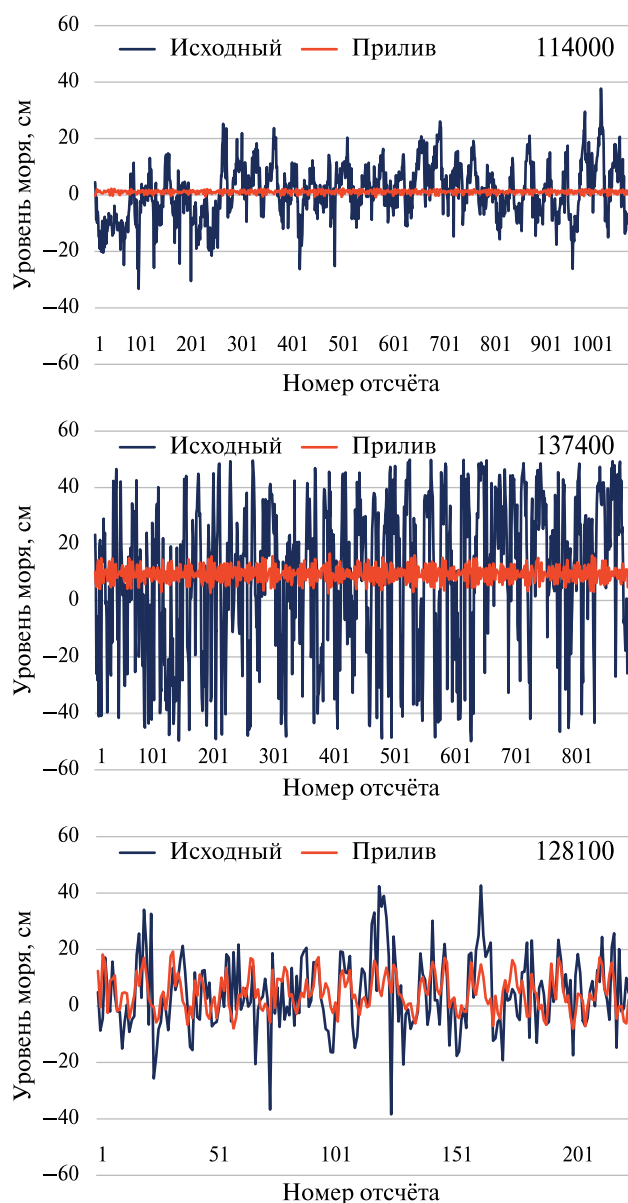


Рис. 6. Вариации исходных (SSHA, синяя линия) и приливных (оранжевая) вариаций уровня моря (в см) в точках 114000, 137400 и 128100

Рассмотрим вначале точку 114000 (координаты $44,368^\circ$ с.ш., $161,319^\circ$ в.д.), расположенную в СЗТО в центральной части изучаемой области. Здесь амплитуда главных приливных волн невелика, наибольшая — у волны Q1: около 0,5 см. Соответственно, выявленные приливные вариации незначительны (максимум 2,3 см, минимум $-0,8$ см, среднее 1,1 см). В вариациях исходного и остаточного уровня явно доминируют годовые колебания, смещение среднего в этих рядах не выглядит существенным изменением. Очевидно, для данной точки и, вероятно, достаточно большого прилегающего района выполненная процедура дополнительного вычитания прилива не имеет большого значения.

В точке 137400 (координаты $35,056^\circ$ с.ш., $148,682^\circ$ в.д.), расположенной в южной части СЗТО, вблизи границы изучаемой области, амплитуда главных приливных волн несколько больше, особенно это относится к полусуточным (наибольшая — у волны M2: 2,3 см). Выявленные приливные вариации здесь существенно больше (максимум 16,6 см, минимум 2,5 см, среднее 9,4 см). И вычитание приливной составляющей, и связанное с этой процедурой смещение среднего значения приводят к значимым изменениям SSHA.

В точке 128100 (координаты $61,133^\circ$ с.ш., $172,823^\circ$ в.д.), расположенной в Беринговом море у его северо-западного побережья, влияние суточных приливов достаточно велико, амплитуда главных составляющих K1 и O1 равна 7,2 и 5,5 см. Приливные вариации здесь ещё более значительны (максимум 19,4 см, минимум $-8,1$ см, среднее 4,6 см). Существенная роль приливной компоненты в вариациях SSHA заметна даже визуально, на неё приходится 23 % общей дисперсии исходного ряда. Интересно отметить, что в приливном ряде ярко выделяется квазиритмическая составляющая с периодом около одного года, природу которой определить сложно, так как годовая гармоника не входила в набор рассчитываемых волн. Для обычного набора суточных и полусуточных гармоник в приливных вариациях уровня моря годовая составляющая не проявляется (имеют место полугодовые неравенства приливов). Скорее всего, этот эффект обусловлен специфической дискретностью альтиметрических данных наблюдений. С целью проверки этого предположения для данной точки был предвычислен приливной ряд с дискретностью 1 ч продолжительностью 19 лет (для учёта межгодовых вариаций величины приливов). Из него были сделаны несколько выборок со скважностью 240 отсчётов, что соответствует дискретности альтиметрических данных. Выяснилось, что действительно в нём присутствует хорошо выраженный годовой цикл с амплитудой около 12 см, с не играющей существенной роли модуляцией с периодом 19 лет.

Сложно понять причину наблюдаемого эффекта, он может быть обусловлен сочетанием амплитуды и фазы приливных волн. В любом случае наличие годовых вариаций в некоторых точках рассматриваемой области также представляется очень существенной проблемой, так как может искажать сезонные колебания на различных её участках и приводить к ошибкам при их изучении.

В вариациях величины приливов в точке 137400 заметны биения с полугодовым периодом и колебания с периодом около двух месяцев внутри групп. Такие колебания также отсутствуют в предвычисленном ряду ежечасных значений приливного уровня. Это показывает, что учесть все нюансы, которые порождает недостаточная точность фильтрации приливов в массиве SSHA, не представляется возможным.

Вероятно, наиболее важная из возникающих проблем связана с наличием средних значений приливного ряда в каждой точке. На рис. 7 показано пространственное распределение этой средней поверхности в изучаемой области. Из рисунка следует, что на подавляющей части рассматриваемой области эти величины положительные, но также выделяются несколько областей с отрицательными значениями, наибольшая — в зоне влияния тёплого течения Курошио. Вблизи этой зоны градиенты уровенной поверхности достигают наибольшей величины, что указывает на существенный вклад ложных постоянных течений, вносимых в результате недостаточной точности устранения приливной составляющей из массива SSHA именно в этой области. Но данная проблема характерна не только для этого района, такие течения существуют повсеместно, хотя их скорости будут не так высоки. Нужно также учитывать, что при расчёте за разные промежутки времени вносимые приливом погрешности в оценки скорости течений могут заметно отличаться от представленных на усреднённой схеме.

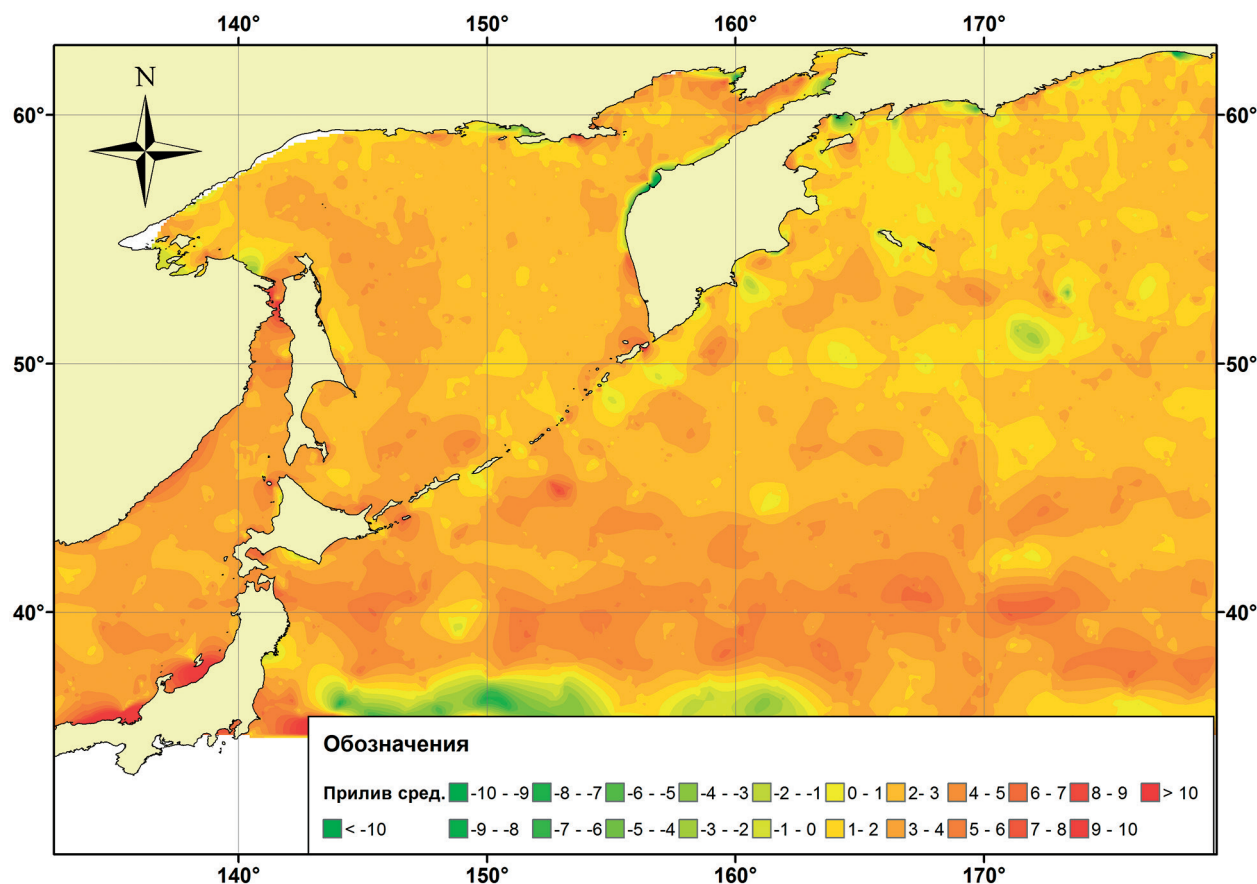


Рис. 7. Пространственное распределение средних значений предвычисленных приливных рядов (в см) в каждой точке подспутниковых треков

Заключение

Прямой расчёт приливов по рядам значений аномалий уровня моря в точках подспутниковых треков, взятых из массива данных спутниковой альтиметрии IMMOAD SSHA, показал, что во многих точках в СЗТО и дальневосточных морях фильтрация приливов была выполнена с недостаточно точностью. Это доказано выявленным присутствием остаточного влияния приливов, выраженного в том, что амплитуда главных приливных волн имеет значения в несколько сантиметров, а в некоторых районах достигает 10 см и более. Связанные с этим влиянием поправки существенны, что заставляет усомниться в возможности применения этого массива данных для расчёта скорости геострофических течений, определения параметров синоптических вихрей и других исследований динамических процессов в океане.

Средние значения приливных рядов также немалы и различаются на разных участках изучаемой акватории. Это указывает на то, что не устранённый в достаточной степени прилив вносит в массив SSHA ложные постоянные течения, наиболее значительные в районе влияния тёплого течения Кюросио.

В разных точках области из-за специфической дискретности рядов спутниковой альтиметрии остаточный прилив создаёт ложные годовые и полугодовые вариации, что может искажать картину сезонных колебаний при использовании массива для их изучения.

Полученные в результате выполненных расчётов очищенные от остаточного прилива ряды данных и следует в дальнейшем использовать для изучения морской динамики.

Литература

1. Шевченко Г. В., Романов А. А. Определение характеристик прилива в Охотском море по данным спутниковой альтиметрии // Исслед. Земли из космоса. 2004. № 1. С. 49–62.
2. Beckley B. D., Callahan P. S., Hancock D. W. et al. On the “cal-mode” correction to Topex satellite altimetry and its effect on the global mean sea level time series // J. Geophysical Research: Oceans. 2017. V. 122. P. 8371–8384. <https://doi.org/10.1002/2017JC013090>.
3. Beckley B., Zelensky N. P., Holmes S. A. et al. Integrated Multi-Mission Ocean Altimeter Data for Climate Research complete time series Version 5.0. 2021. PO.DAAC, CA, USA. <https://doi.org/10.5067/ALTTS-TJA50>.
4. Benada J. R. Merged GDR (Topex/Poseidon). Generation B Users Handbook. Version 2.0 / Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PODAAC), Jet Propulsion Laboratory. Pasadena: JPL, 1997. 131 p.
5. Cartwright D. E., Edden A. C. Corrected tables of tidal harmonics // Geophysical J. Intern. 1973. V. 33. P. 253–264.
6. Choi B. H., Kim D. H., Fang Y. Tides in the East Asian seas from a fine-resolution global ocean tide model // Marine Technology Society J. 1999. V. 33. Iss. 1. P. 36–44.
7. Ray R. D., Erofeeva S. Y. Long-period tidal variations in the length of day // J. Geophysical Research: Solid Earth. 2014. V. 119. P. 1498–1509. DOI: 10.1002/2013JB010830.
8. Zaron E. D. Baroclinic tidal sea level from exact-repeat mission altimetry // J. Physical Oceanography. 2019. V. 49. Iss. 1. P. 193–210. DOI: 10.1175/JPO-D-18-0127.1.

On the accuracy of removing the tidal component from IMMOAD SSHA satellite altimetry data

G. V. Shevchenko^{1,2}, A. A. Romanov³, A. T. Tsoi¹

¹ Russian Federal Research Institute of Fisheries and Oceanography, Sakhalin Branch
Yuzhno-Sakhalinsk 693023, Russia
E-mail: Shevchenko_zhora@mail.ru

² Institute of Marine Geology and Geophysics FEB RAS
Yuzhno-Sakhalinsk 693023, Russia

³ AO Central Research Institute for Machine Building
Korolev 141070, Moscow Region, Russia

An array of level surface anomalies formed according to data from four artificial Earth satellites (IMMOAD SSHA) for 1992–2022 was tested for tidal component elimination quality. The testing procedure was carried out by direct calculation of the amplitudes and phases of 8 main tidal waves (4 diurnal and 4 semidiurnal ranges) at each point of the subsatellite tracks. It was revealed that in a number of areas (primarily in the coastal waters of the Sea of Okhotsk and in the zone of influence of the warm Kuroshio Current), the amplitudes of several waves have a value of several centimeters, which confirms the insufficient accuracy of eliminating tides in the tested massif. The average values of the tidal series are also not small, and differ in different parts of the studied water area. This indicates that the tide, which has not been sufficiently eliminated, introduces false constant currents into the massif, the most significant in the area of influence of the warm Kuroshio Current. At some points in the region, due to the specific discreteness of satellite altimetry series, the residual tides create false annual and semi-annual variations, which can distort the pattern of seasonal fluctuations when using the array to study them.

Keywords: satellite altimetry, sea level, anomaly, tide, amplitude, phase, northwestern part of the Pacific Ocean, Far Eastern seas

Accepted: 11.08.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-20-29

References

1. Shevchenko G. V., Romanov A. A., Tides characteristics in the Sea of Okhotsk definition from Topex/Poseidon sea level data, *Earth Research from the Space*, 2004, No. 1, pp. 49–62 (in Russian).
2. Beckley B. D., Callahan P. S., Hancock D. W. et al., On the “cal-mode” correction to Topex satellite altimetry and its effect on the global mean sea level time series, *J. Geophysical Research: Oceans*, 2017, Vol. 122, pp. 8371–8384, <https://doi.org/10.1002/2017JC013090>.
3. Beckley B., Zelensky N. P., Holmes S. A. et al., *Integrated Multi-Mission Ocean Altimeter Data for Climate Research complete time series Version 5.0*, 2021, PO.DAAC, CA, USA, <https://doi.org/10.5067/ALTTS-TJA50>.
4. Benada J. R., *Merged GDR (Topex/Poseidon), Generation B Users Handbook, Version 2.0*, Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PODAAC), Jet Propulsion Laboratory, Pasadena: JPL, 1997, 131 p.
5. Cartwright D. E., Edden A. C., Corrected tables of tidal harmonics, *Geophysical J. Intern.*, 1973, Vol. 33, pp. 253–264.
6. Choi B. H., Kim D. H., Fang Y., Tides in the East Asian seas from a fine-resolution global ocean tide model, *Marine Technology Society J.*, 1999, Vol. 33, Issue 1, pp. 36–44.
7. Ray R. D., Erofeeva S. Y., Long-period tidal variations in the length of day, *J. Geophysical Research: Solid Earth*, 2014, Vol. 119, pp. 1498–1509, DOI: 10.1002/2013JB010830.
8. Zaron E. D., Baroclinic tidal sea level from exact-repeat mission altimetry, *J. Physical Oceanography*, 2019, Vol. 49, Issue 1, pp. 193–210, DOI: 10.1175/JPO-D-18-0127.1.