Особенности циркуляции северо-западной части Тихого океана по данным спутниковой альтиметрии

А.А. Романов, А.А. Романов

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

Появившиеся в последнее время интегральные продукты, содержащие непрерывные измерения последовательных миссий Topex/Poseidon, Jason-1, -2 и -3 предоставляют уникальные возможности по изучению межгодовой циркуляции, а также выявлению особенностей месячной и сезонной циркуляции в акватории за весь период альтиметрических наблюдений из космоса. В работе обсуждаются результаты исследований гидрологического режима у восточного побережья Камчатки в период лето-осень 2020 г. Представлено распределение аномалий высоты морской поверхности, а также распределение абсолютной динамической топографии для Камчатского региона и всей северной части Тихого океана с различным временным усреднением. Приведён анализ особенности циркуляции в исследуемых регионах, обсуждаются выявленные различия режимов на среднемесячных и среднесезонных распределениях абсолютной динамической топографии поверхности океана за период 1992-2020 гг. Выявлены особенности в поведении её значений в различных частях акватории: повышение уровня рукава Северо-Тихоокеанского течения с 60 до 90 см и выше, а также повышение уровня абсолютной топографии в районе Алеутских о-вов и в открытой части Тихого океана на 20-30 см в зависимости от временного периода. Обсуждается характер изменений среднемесячных и среднесезонных распределений аномалий высоты морской поверхности, продемонстрировано существенное изменение рассматриваемой характеристики в юго-западной части Берингова моря в весенние и осенние месяцы: вариации аномалий составили от -10 до 15 см.

Ключевые слова: спутниковая альтиметрия, дистанционное зондирование океана, динамика поверхности океана, восточное побережье Камчатки, северная часть Тихого океана, аномалии высоты морской поверхности, абсолютная динамическая топография

Одобрена к печати: 25.08.2023 DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-5-232-245

Введение

В работах (Романов и др., 2020; Cherniawsky et al., 2009; Pakhomov et al., 2019) приводились результаты исследований особенностей циркуляции вод в зал. Аляска, анализировались различные источники информации о состоянии среды: выделялись мезомасштабные структуры по данным спутниковой альтиметрии (Beckley et al., 2023; Benada, 1993), которые хорошо соответствовали детектируемым вихревым структурам на распределении температуры поверхности и концентрации хлорофилла (Романов и др., 2020). Кроме того, анализировался гидрологический режим, выделяемый на среднемесячных и среднесезонных распределениях абсолютной динамической топографии в регионе. Достаточно сложно рассматривать изменения гидрологического режима, не понимая картину в бассейне в целом, поэтому в рамках настоящей статьи сделана попытка посмотреть изменчивость топографии всей акватории северной части Тихого океана, а также её западной части.

Уровень поверхности и циркуляция северо-западной части Тихого океана по данным спутниковой альтиметрии рассматривались, например, в работах (Алояров и др., 2018; Белоненко, 2014; Белоненко и др., 2011), при этом в область проведённого анализа практически не попал зал. Аляска и эти комплексные исследования в регионе были проведены более десяти лет назад. За последнее время появились новые альтиметрические продукты, использование данных которых существенно расширит временной ряд доступных измерений.

Новый продукт Integrated Multi-Mission Ocean Altimeter Data for Climate Research (IMMOAD v5.1) (Beckley et al., 2023) содержит альтиметрические измерения во всех акватори-

ях Мирового океана (с учётом баллистических ограничений альтиметрических миссий) практически за три десятилетия: с 1992 по 2022 г. Альтиметрическая информация представляет собой набор данных с четырёх космических аппаратов (КА): TOPEX/Poseidon (*англ*. Topography Experiment), Jason-1, -2, -3 (Beckley et al., 2023), стянутых в узлы «стандартного трека», т.е. для последующего восстановления распределения потребуется осуществить процедуру аппроксимации данных в узлы регулярной сетки. Для совместного использования данных различных альтиметрических космических аппаратов и их совместного анализа авторами продукта IMMOAD v5.1 (Beckley et al., 2023) были реализованы процедуры взаимной калибровки информации, а также приведены в соответствие используемые геофизические поправки (тропосферные, приливные и т.д.).

Кроме того, доступные исследования в акватории северной части Тихого океана зачастую ограничены исследованием аномалий высоты морской поверхности (Алояров и др., 2018), тогда как вопросы распределения абсолютной динамической топографии в регионе остаются за рамками рассмотрения. Часто анализируются исключительно среднесезонная (Алояров и др., 2018) и межгодовая (Белоненко и др., 2011; Белоненко, 2014) изменчивость в регионе, которые, вполне вероятно, будут демонстрировать более спокойный характер изменчивости в регионе по отношению к более коротким (месячным) периодам усреднения.

Интерес к рассматриваемой части Мирового океана в последние пять лет неуклонно растёт. Под эгидой Международной пятисторонней (США, Канада, Япония, Россия и Республика Корея) Северо-Тихоокеанской комиссии по анадромным рыбам NPAFC (*англ.* North Pacific Anadromous Fish Commission) в 2019 г. (Pakhomov et al., 2019), 2020 г. (Preliminary..., 2020), 2021 г. (NPAFC..., 2021, 2022) и в 2022 г. были проведены исследования всей северо-западной акватории Тихого океана: от берегов Камчатского п-ова до Аляски (NPAFC..., 2021, 2022, 2023). Впервые в истории были выполнено пан-Тихоокеанское эпипелагическое исследование экосистемы акватории для улучшения понимания механизмов, регулирующих популяцию лосося и определяющих его выживание как в прибрежной области, так и в открытом океане.

При этом в указанных выше экспериментах практически не привлекались данные дистанционного зондирования поверхности океана, не проводился анализ изменчивости временных рядов гидрофизических характеристик морской поверхности, хотя одна из задач исследований состоит в оценке воздействия климатических изменений на условия обитания и популяцию основных морских гидробионтов и анадромных рыб, в первую очередь лососёвых.

Результаты этого изучения направлены на расширение понимания комплексной динамики в регионе с учётом появившихся в последнее время новых альтиметрических данных. В исследовании представлены среднемесячные и среднесезонные распределения аномалий высоты морской поверхности, а также абсолютной динамической топографии отдельно для западной и всей северной части Тихого океана, построенные за период с 1992 по 2020 г. Оценивается изменение циркуляции в регионе по сравнению с опубликованными ранее исследованиями с учётом дополнительного, практически десятилетнего набора альтиметрической информации. Кроме того сформирован набор распределения аномалий высоты морской поверхности и карт абсолютной динамической топографии с различным периодом временного усреднения, необходимый для совместного анализа с результатами экспериментов, аналогичных проведённым под эгидой NPAFC.

Вопросы межгодовой изменчивости и более глубокое исследование изменения циркуляции в рамках каждого из годов с различными периодами усреднения предполагаются предметом будущих исследований.

Особенности циркуляции в Беринговом море и возле побережья Камчатки

Циркуляция в акватории Берингова моря существенно определяется холодным Курильским течением (Оясио), которое проходит вдоль Камчатки, Курильских о-вов к берегам Японии.

Течение характеризуется относительно небольшой шириной (около 50 км) и невысокой скоростью — от 0,25 до 1 м/с.

На четырёх распределениях абсолютной динамической топографии за август – сентябрь 2020 г. (*рис. 1*) представлена достаточно типичная и известная для этого периода картина циркуляции в рассматриваемом регионе. Отчётливо определяется рукав основного течения, идущего вдоль восточного побережья Камчатки, а также квазистационарные вихревые образования в центральной (в районе Курильской гряды) и восточной частях рассматриваемого региона. Эти структуры, достаточно часто обсуждаемые в литературе, носят антициклонический характер и имеют высоту уровня до 40–45 см и скорости 20–30 см/с.



Рис. 1. Распределение абсолютной динамической топографии в районе п-ова Камчатка с нанесёнными векторами течений в геострофическом приближении с КА Jason-3: *a* — 20200810-20, 166-й цикл, с 10.08.2020 по 20.08.2020; *б* — 20200820-30, 167-й цикл, с 20.08.2020 по 30.08.2020; *в* — 20200830-09, 168-й цикл, с 30.08.2020 по 09.09.2020; *e* — 202000909-19, 169-й цикл, с 09.09.2020 по 19.09.2020

При этом скорость основного течения практически минимальна и составляет порядка 20 см/с. Подобный эффект объясняется относительно невысоким градиентом высоты поверхности океана в рассматриваемый период времени. Изменение высоты поверхности составляет порядка 15-20 см на акватории Тихого океана от побережья Камчатки до центральной части рассматриваемого региона (по 50° с. ш.), а уровень Берингова моря несколько выше. Регион на северо-востоке (см. *рис. 1*) характеризуется абсолютной динамической топографией поверхности со значениями порядка 40 см, при этом скорость течений в этой части также невелика и составляет 5-10 см/с.

На усреднённом за период с 1992 по 2020 г. распределении абсолютной динамической топографии в регионе (*puc. 2a*) отчётливо отличается поток течения Оясио вдоль восточного побережья п-ова Камчатка и Курильских о-вов, протекающий в юго-западном направлении. Даже на существенном периоде временного усреднения сохраняется характер распределения абсолютной динамической топографии: изменение в горизонтальном направлении не превышает 15 см. Для Берингова моря ситуация аналогична предыдущему распределению: в целом высота поверхности составляет около 40 см, при этом уровень снижается к Алеутским о-вам и продолжает падать к центральной части рассматриваемого региона. Подобная картина циркуляции характерна для этой части Тихого океана, которая определяется Оясио и Северо-Тихоокеанским течениями (горизонтальная ветвь течения Оясио хорошо различима на юге рассматриваемого региона на рис. 1 и 2). Амплитуда изменения аномалии высоты морской поверхности (*рис. 26*) в открытой части не превышает 2 см (диапазон от –1 до 1 см). В области Северных Курил со стороны открытой части акватории Тихого океана, а также в центре региона различаются вихревые структуры со значениями экстремумов –1 и 1 см соответственно. Но в целом можно сказать, что среднее многолетнее распределение аномалий высот практически эквивалентно нулю, т.е. средняя высота морской поверхности для этого региона действительно представляет собой «норму» высоты.



Рис. 2. Среднее распределение за весь период наблюдений в районе п-ова Камчатка: *а* — абсолютная динамическая топография; *б* — аномалия высоты морской поверхности

Несомненный интерес представляет собой открытая часть Тихого океана, в которой, несмотря на существенное временное усреднение рассматриваемого распределения, выделяется ряд циклонических и антициклонических вихрей. Особенности циркуляции (*puc. 3*, см. с. 236), характерные для зимнего периода в рассматриваемом регионе, определяются сильными циклоническими вихрями в регионах с вершинами с координатами 157° в.д., 45° с.ш.; 162° в.д., 50° с.ш. и 165° в.д., 46° с.ш.; 170° в.д., 52° с.ш., а также существенным циклоническим движением водных масс в открытом океане. При этом значения абсолютной динамической топографии, характерные для января, изменяются от 4 см в открытой части Тихого океана до 36 см на восточном побережье Камчатки. В феврале значения абсолютной динамической топографии в открытой части снижаются до 0 см, при том что для декабря характерны существенно более высокие значения — 8-12 см.

Необходимо отметить, что характер циркуляции в регионе существенно меняется в летние месяцы: если вплоть до мая в среднем характерен установившийся в предыдущие месяцы гидрологический режим с чётко выраженным рукавом Оясио, перемещающим водные массы в юго-западном, а затем в восточном направлении, то в июне течение явно ослабевает, градиент абсолютной динамической топографии уменьшается, а уровень топографии в центральной части растёт и достигает к июню значений порядка 15 см, к июлю — 18–20 см, а в августе — 20–24 см. При этом в осенние месяцы уровень открытой части Тихого океана продолжает расти, достигая 22–24 см в октябре, и только к ноябрю характер циркуляции в регионе начинает возвращаться к картине, характерной для зимнего периода.



Рис. 3. Среднемесячное распределение абсолютной динамической топографии в районе п-ова Камчатка за 1992–2020 гг.

Абсолютная динамическая топография Берингова моря также имеет существенный месячный ход. Изменения уровня составляют почти 20 см: от 20 см в феврале до 36—40 см в начале осени (см. *puc. 3*).

Анализ месячных распределений аномалий высоты морской поверхности в регионе (усреднённых за аналогичный период времени) показывает наличие существенных изменений в юго-западной части рассматриваемой акватории (*puc. 4*).



Рис. 4. Среднемесячное распределение аномалий высоты морской поверхности в районе п-ова Камчатка за 1992–2020 гг.



Рис. 5. Среднесезонное распределение абсолютной динамической топографии в районе п-ова Камчатка за 1992–2020 гг.



Рис. 6. Среднесезонное распределение аномалий высоты морской поверхности в районе п-ова Камчатка за 1992–2020 гг.

В декабре в южной и юго-западной части акватории наблюдаются аномалии высоты морской поверхности (над средней высотой) порядка 4 см, тогда как в январе, феврале и марте в этой же области чётко выделяются структуры со значениями аномалий высот до -8 см.

Различаются вихревые структуры у юго-восточного побережья п-ва Камчатка (50° с. ш.). Особенно ярко выраженными они становятся в осенние месяцы, достигая максимума в 12–15 см в октябре (см. *рис. 4*). В целом же характер изменения аномалий высоты поверхности полностью аналогичен распределениям, представленным на *рис. 3*.

Сезонные распределения абсолютной динамической топографии (*puc. 5*, см. с. 238) и аномалии высоты морской поверхности (*puc. 6*, см. с. 238), полученные с учётом усреднения альтиметрических данных в регионе за период 1992 и 2020 гг., показывают в целом аналогичную среднемесячным распределениям картину. В зимний период наблюдается общее циклоническое движение в открытой части океана, при этом в восточной части явно виден циклонический вихрь со значением абсолютной динамической топографии в максимуме около 4 см (см. *puc. 5*), определяющийся устойчивой аномалией (см. *puc. 6*).

Весной характер изменения высоты абсолютной динамической топографии меняется, перепад становится незначительно меньше, но существенно меняется градиент высот и, следовательно, скорость течения уменьшается (см. *рис. 5*). В летние месяцы перепад высот между открытой частью океана и восточным побережьем Камчатки становится совсем небольшим: не превышает 8 см (в зимний период 25–30 см), осенью картина распределения высоты абсолютной динамической топографии в регионе становится практически равномерной, циклонический характер циркуляции течения Оясио — практически неразличимым (см. *рис. 5*).

Интересно эволюционируют вихревые структуры, наблюдаемые вдоль параллели 50° с. ш. от восточного побережья п-ова Камчатка вглубь открытой части Тихого океана. В зимний и весенний период минимум высоты «западной» структуры (160° в.д.) составляет порядка 6–8 см, «восточной» (168° в.д.) — 3-4 см, при этом эти вихри являются циклоническими. Летом характер изменчивости абсолютной динамической топографии существенно эволюционирует (см. *рис. 5*), в регионе преобладают антициклонические вихри (напомним, что идёт речь о существенном периоде временного усреднения значений абсолютной динамической топографии): три структуры на меридианах 159, 162 и 167° в.д. со значениями максимумов 25, 23 и 22 см соответственно. В осенний период, на фоне общего повышения уровня топографии, увеличиваются значения максимумов «левого» и «правого» вихрей (до 30 и 26 см соответственно), центральная структура (162° в.д.) несколько «размывается» и перестаёт быть чётко различимой.

Распределение аномалий высоты морской поверхности (см. *рис. 6*), построенное аналогично распределениям, представленным на *рис. 5* с точки зрения периодов временного усреднения, позволяет более явно различить структуры, о которых говорилось выше. При этом можно сделать вывод, что зимой циклонический вихрь с координатами центра около 50° с. ш. и 157° в. д. носит крайне устойчивый характер, его минимум составляет 3 см. Летом и особенно осенью мы видим устойчивые антициклонические вихри (аналогично распределениям, представленным на *рис. 5*) с координатами центров 50° с. ш., 158° в. д. и 166° в. д. и с максимальными значениями аномалий, достигающими 10 см. При этом в осенние месяцы распределение аномалий высоты морской поверхности в юго-восточной части региона имеет явно более возмущённый характер, что связанно, по-видимому, с перестройкой характера общей циркуляции в этой части Тихого океана.

Особенности циркуляции северо-западной части Тихого океана

Аналогичным образом были обработаны альтиметрические данные для всей северо-западной части Тихого океана, от берегов Камчатки до берегов Аляски. Анализировались как аномалии высоты морской поверхности, так и абсолютная динамическая топография поверхности океана.

На *рис.* 7 и 8 (см. с. 240) представлены среднемесячные распределения абсолютной динамической топографии и аномалии высоты морской поверхности. Крупномасштабная циркуляция северо-западной части Тихого океана в принципе хорошо известна (Белоненко, 2014; Белоненко и др., 2011). Превалирующим течением в регионе является Северо-Тихоокеанское течение, которое затем распадается на Аляскинское и Калифорнийское. В западной части превалирует Курильское течение (Оясио), которое замыкает циркуляцию водных масс в регионе.



Рис. 7. Среднемесячное распределение абсолютной динамической топографии в северо-западной части Тихого океана за период 1992–2020 гг.



Рис. 8. Среднемесячное распределение аномалий высоты морской поверхности в северо-западной части Тихого океана за 1992–2020 гг.

На юге региона (см. *рис.* 7) хорошо различим рукав Северо-Тихоокеанского течения со значениями абсолютной динамической топографии в декабре, январе и феврале до 80 см, рукав Аляскинского течения — на востоке и юго-востоке со значениями почти вдвое меньше. Но относительно мелкомасштабные явления на этих распределениях практически неразличимы. Распределения аномалий высоты морской поверхности для такого динамически активного и крупного региона существенно более информативны для выделения динамически активных областей в регионе.

При этом наблюдаемая месячная динамика уровня абсолютной динамической топографии региона позволяет говорить о том, что характер крупномасштабной циркуляции несколько варьируется в течение года. Так, в зимние месяцы (см. *рис.* 7) рукав Аляскинского течения носит менее выраженный характер, в летние месяцы и начале осени значения абсолютной динамической топографии в Аляскинском заливе резко повышаются, и даже на таком масштабе видны вихревые структуры с амплитудой 55–60 см, образующиеся вдоль побережья Северной Америки. Далее, в осенне-зимний период уровень снижается до 40–45 см.

Несколько меняется характер циркуляции в открытой части Тихого океана, притом что область низких значений абсолютной динамической топографии практически неизменна геометрически. В то же время наблюдается значительный временной ход высот поверхности. Если в зимний период, особенно в феврале и марте, значения абсолютной топографии в центральной части региона в районе Алеутской гряды составляют порядка 10 см, то в летне-осеннем периоде (июль, август, сентябрь) они достигают 30–35 см. Вариации значений абсолютной динамической топографии наблюдаются непосредственно в области Северо-Тихоокеанского течения: если в октябре, ноябре и декабре максимум высоты составляет порядка 80 см, то в период с марта по июнь высота ниже и составляет 60–70 см.

Анализ распределения аномалии высоты морской поверхности для северной части Тихого океана позволяет выделить западную часть региона как более динамически активную. На *рис. 8* можно выделить несколько областей, потенциально интересных для проведения последующих судовых исследований гидрофизических характеристик водных масс. Анализ распределения аномалии высоты морской поверхности показывает, что можно выделить акватории юго-западной части в районе 150° в.д., 39° с.ш.; юго-западный – южный регион от 140° в.д. до 180° в.д. вдоль 40° с.ш.; регион от 160° в.д. до 180° в.д., от 50° с.ш. до 60° с.ш. Кроме того несомненный интерес представляет собой динамика структур на фоне Аляскинского течения вдоль берегов Северной Америки.

В юго-западной части явно выделяется группа циклонических и антициклонических вихрей со значениями аномалий от -10 до 15 см и более. Скорее всего, они представляют собой меандры Северо-Тихоокеанского течения, поскольку они выделяются на фоне его основного рукава. Активная область на юге и юго-западе простирается вдоль 40° с.ш., фактически до 180° в.д.

На востоке вдоль западного побережья Северной Америки выделяется группа циклонических вихрей с характерным размером около 250 км в «диаметре» (Романов и др., 2020). Абсолютная динамическая топография для них в максимуме составляет 30–40 см, аномалия высоты морской поверхности — около 10–12 см. Характер распределения аномалии высоты морской поверхности, представленной на *рис. 8*, позволяет сказать, что в целом зал. Аляска на фоне всей северо-западной части Тихого океана, и особенно Охотского моря или области Северо-Тихоокеанского течения на юге региона, представляет собой относительно спокойную акваторию, в которой практически не наблюдается серьёзных аномалий высоты морской поверхности.

На среднесезонном распределении в целом сохраняется аналогичный характер пространственного изменения аномалии высоты и абсолютной динамической топографии (*puc. 9 и 10*, см. с. 242). Распределение абсолютной динамической топографии хорошо характеризует общий гидрологический режим в регионе, в целом подтверждая результаты анализа, представленные выше. В зимне-весеннем периоде наблюдаются существенные минимумы значений топографии (см. *puc. 9*), достигающие на этом периоде усреднения 10–15 см, тогда как в летне-осеннем периоде уровень повышается. Минимальные значения при этом остаются практически неизменными — 15–20 см; значительно повышаются максимальные значения абсолютной топографии поверхности в области Северо-Тихоокеанского течения: до 90 см и выше. В летний период уменьшается площадь области низкого уровня поверхности, расположенная в Беринговом море и от Алеутских о-вов в сторону открытой части Тихого океана, высота топографии Берингова моря также повышается, достигая максимальных значений в осеннем периоде.



Рис. 9. Среднесезонное распределение абсолютной динамической топографии в северо-западной части Тихого океана за 1992–2020 гг.



Рис. 10. Среднесезонное распределение аномалий высоты морской поверхности в северо-западной части Тихого океана за 1992–2020 гг.

Распределение аномалии высоты морской поверхности (см. *рис. 10*) демонстрирует значительную изменчивость в весенний и осенний периоды. В весенний период в юго-западной части превалируют структуры циклонического характера с минимальными значениями аномалии от -10 до -5 см. В осенний период характер структур меняется на противоположный (структуры приобретают антициклонический характер), а значения аномалий повышаются достаточно значительно. В юго-западной части наблюдаются вихревые структуры с максимумом аномалии вплоть до 15 см. В летний и зимний период характер распределения аномалии высоты морской поверхности в регионе носит существенно более спокойный характер, однако в юго-западной части региона всё же можно различить структуры с относительно небольшими положительными значениями аномалий высот.

Заключение

Представлены результаты анализа особенностей циркуляции северной части Тихого океана по данным спутниковой альтиметрии. Анализируются среднемесячные и среднесезонные пространственные распределения абсолютной динамической топографии, а также аномалии высоты морской поверхности, построенные за период с 1992 по 2020 г. Использована информация четырёх альтиметрических миссий — TOPEX/Poseidon, Jason-1, -2 и -3, которая прошла необходимую стадию обработки и интеркалибровки с учётом особенностей функционирования каждой альтиметрической миссии (Integrated..., 2021).

Представленные в работе распределения абсолютной динамической топографии для регионов восточного побережья Камчатки и всей северо-западной части Тихого океана в целом характеризуют месячную и сезонную изменчивость гидрологического режима. На этих распределениях чётко выделяются основные рукава всех основных течений в акватории. Результаты работы хорошо согласуются с выводами более ранних исследований, проведённых вдоль Камчатского п-ова, в зал. Аляска или в акватории Тихого океана (Белоненко, 2014; Белоненко и др., 2011; Романов и др., 2020; Pakhomov et al., 2019). Кроме того, анализ распределения аномалий высоты поверхности океана в регионе показал, что среднюю высоту морской поверхности, представленную в интегрированном массиве альтиметрической информации, можно рассматривать в качестве «нормы» высоты поверхности в исследуемом регионе.

В отличие от известных работ по этому региону (Алояров и др., 2018; Белоненко, 2014; Белоненко и др., 2011) значительно расширен период исследования (он достиг практически 30-летнего периода), к тому же дополнительно анализируется среднемесячная изменчивость отдельно для западной и для всей акватории северной части Тихого океана. Обсуждены особенности месячного и сезонного хода не только аномалии морской поверхности в регионе, но и абсолютной топографии поверхности океана. Показано, что присутствует существенная месячная и сезонная изменчивость режимов циркуляции, значительно изменяется уровень абсолютной динамической топографии поверхности как в западной, так и во всей северной части Тихого океана, причём изменение топографии в районе Алеутских о-вов достигает 25–30 см между зимним и осенним сезоном.

Анализ распределения аномалии высоты морской поверхности позволил сделать вывод, что в целом в рассматриваемый временной период (с 1992 по 2020 г.) юго-западная часть региона представляется более «активной», хотя на среднемесячных распределениях различаются области со значительными вариациями аномалии, достигающими 10–12 см вдоль побережья Северной Америки. Исследование характера среднемесячного распределения аномалии морской поверхности показывает, что в зимние и весенние месяцы (с января по май) аномалии высоты в юго-западной части отрицательны и составляют менее 10 см, затем характер распределения меняется и начиная с августа и, по сути, до января аномалии являются существенно положительными, с характерными значениями около 15 см. Распределение аномалии в июне и июле отражает развитие некоторого переходного процесса.

Характер среднесезонной изменчивости более сглажен (что хорошо объясняется среднемесячным распределением). Выделяются существенные отрицательные аномалии в юго-западной части в весеннее время, тогда как осенью аномалии высоты достигают существенных положительных значений. В зимний и осенний периоды распределения носят «переходный» характер. Кроме того, на среднесезонных распределениях практически неразличимы положительные аномалии вдоль побережья Северной Америки, которые хорошо различались для периода с июня по сентябрь.

Современные исследования состояния морской среды сегодня невозможно представить без комплексного использования различных источников данных: результатов *in situ* измерений и экспериментов, а также информации дистанционного зондирования подстилающей поверхности из космоса. Комплексное изучение всей системы тихоокеанской акватории с привлечением как судовых средств, так и информации дистанционного зондирования позволит в перспективе получить беспрецедентные по своей полноте экспериментальные данные, сформировав на их основе интегральную гидрологическую модель региона. Результаты подобных работ не только позволят получить дополнительный ряд информации о состоянии морской поверхности для улучшения понимания условий существования и изменчивости популяции семейств морских гидробионтов, но и внесут ощутимый вклад в понимание фундаментальных гидрофизических процессов и механизмов формирования климата нашей планеты.

Литература

- 1. Алояров Р. М., Федоров А. М., Белоненко Т. В. Исследование стерических колебаний в северо-западной части Тихого океана по спутниковым данным // Ученые записки Российского гос. гидрометеоролог. ун-та. 2018. № 53. С. 56–71.
- 2. *Белоненко Т.В.* Крупномасштабная изменчивость уровня северо-западной части Тихого океана на основе спутниковых альтиметрических измерений: дис. ... д-ра геогр. наук. СПб., 2014. 40 с.
- 3. Белоненко Т. В., Колдунов А. В., Колдунов В. В., Май Р. И., Рубченя А. В., Старицын Д. К., Фукс В. Р. Атлас изменчивости уровня Северо-западной части Тихого океана. СПб.: Изд-во СМИО-ПРЕСС, 2011. 304 с.
- 4. *Романов А.А., Романов А.А., Устинова М.В.* Анализ динамики уровенной поверхности океана в акватории залива Аляска по данным спутниковой альтиметрии // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2020. Т. 17. № 4. С. 256–266. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-256-266.
- 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 Inst. Technology, 2023. 47 p. https://doi.org/10.5067/ALTUG-TJ151.
- 6. *Benada R.* PO.DAAC merged GDR (TOPEX/Poseidon) user's handbook. Rep. JPL D-11007. Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 1993. 111 p.
- 7. *Cherniawsky J. Y., Foreman M. G. G., Cummins P.* Ocean altimetry applications in Pacific Ocean and beyond // North Sea Baltic Sea Workshop. Delft, 2009. 40 p.
- NPAFC Technical Report 17. Third NPAFC-IYS Virtual Workshop on Linkages between Pacific Salmon Production and Environmental Changes // npafc.org. 2021. 220 p. https://npafc.org/wp-content/uploads/ technical-reports/Tech-Report-17-DOI/Technical-Report-17.pdf.
- 9. NPAFC International Year of Salmon // yearofthesalmon.org. 2022. 2 p. https://npafc.org/wp-content/ uploads/Public-Documents/News-Release/2022-NPAFC_IYS-Press-Release.pdf.
- NPAFC Technical Report 18. Virtual Conference on Winter Ecology of Pacific Salmon and Results from the Two Gulf of Alaska Expeditions // npafc.org. 2023. 155 p. https://yearofthesalmon.org/wp-content/uploads/2023/01/Technical-Report-18.pdf.
- Pakhomov E.A., Deeg C., Esenkulova S., Foley G., Hunt B. P.V., Ivanov A., Jung H. K., Kantakov G., Kanzeparova A., Khleborodov A., Neville C., Radchenko V., Shurpa I., Slabinsky A., Somov A., Urawa S., Vazhova A., Vishnu P. S., Waters C., Weitkamp L., Zuev M., Beamish R. Summary of preliminary findings of the International Gulf of Alaska expedition onboard the R/V Professor Kaganovskiy during February 16 – March 18, 2019 // https://npafc.org. 2019. Article 1858. 25 p.
- 12. Preliminary Results for the 2020 Gulf of Alaska Expedition Announced! // yearofthesalmon.org. 2020. 9 p. https://yearofthesalmon.org/preliminary_findings_2020/.

Features of the circulation in the northwestern Pacific Ocean according to satellite altimetry data

A.A. Romanov, A.A. Romanov

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

The integrated products that have recently appeared, containing continuous measurements of successive TOPEX/Poseidon, Jason-1, -2, and -3 missions, provide unique opportunities for studying interannual, as well as identifying features of monthly and seasonal circulation in the water area for the entire period of altimetry observations from space. The paper discusses the results of studies of the hydrological regime of the eastern coast of Kamchatka in the summer-autumn period of 2020. The distributions of the sea surface height anomalies, as well as the distributions of the absolute dynamic topography for the Kamchatka region and the entire northern part of the Pacific Ocean with different time averaging are presented. An analysis of the features of circulation in the studied regions is presented, and the revealed differences in the regimes on the average monthly and average seasonal distributions of the absolute dynamic topography of the ocean surface for the period 1992–2020 are discussed. Peculiarities in the behavior of its values in different parts of the water area are revealed: an increase in the level of the branch of the North Pacific Current from 60 to 90 cm and higher, as well as an increase in the level of absolute topography in the area of the Aleutian Islands and in the open part of the Pacific Ocean by 20-30 cm, depending on time period. The nature of changes in the average monthly and average seasonal distributions of the sea surface height anomalies is discussed, a significant change in the considered characteristic in the southwestern part in the spring and autumn months is demonstrated: the anomaly variations ranged from -10 to 15 cm.

Keywords: satellite altimetry, ocean remote sensing, ocean surface dynamics, east coast of Kamchatka, northwestern Pacific Ocean, sea surface height anomalies, absolute dynamic topography

Accepted: 25.08.2023 DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-232-245

References

- 1. Aloiarov R. M., Fedorov A. M., Belonenko T. V., Steric Level Oscillation in the Northwestern Part of the Pacific: Satellite Data Analysis, *Uchenie zapisky Rossiiskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*, 2018, No. 53, pp. 56–71 (in Russian).
- 2. Belonenko T.V., *Krupnomasshtabnaya izmenchivost' urovnya severo-zapadnoi chasti Tikhogo okeana na osnove sputnikovykh al'timetricheskikh izmerenii: Diss. dokt. geogr. nauk* (Large-scale level variability in the Pacific Northwest based on satellite altimetry measurements, Dr. geogr. sci. thesis), Saint Petersburg, 2014, 40 p. (in Russian).
- 3. Belonenko T. V., Koldunov A. V., Koldunov V. V., Mai R. I., Rubchenya A. V., Staritsyn D. K., Fuks V. R., *Atlas izmenchivosti urovnya Severo-zapadnoi chasti Tikhogo okeana* (Atlas of level variability in the Northwest Pacific Ocean), Saint Petersburg: SMIO-PRESS, 2011, 304 p. (in Russian).
- 4. Romanov A.A., Romanov A.A., Ustinova M.V., Analysis of the dynamics of the level surface of the ocean in the waters of the Gulf of Alaska according to satellite altimetry data, *Sovremennye problemy distantsion-nogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2020, Vol. 17, No. 4, pp. 256–266 (in Russian).
- 5. 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 Inst. Technology, 2023, 47 p., https://doi.org/10.5067/ALTUG-TJ151.
- 6. Benada R., *PO.DAAC merged GDR (TOPEX/Poseidon) user's handbook*, Rep. JPL D-11007, Pasadena: Jet Propulsion Laboratory, 1993, 111 p.
- 7. Cherniawsky J. Y., Foreman M. G. G., Cummins P., Ocean altimetry applications in Pacific Ocean and beyond, *North Sea – Baltic Sea Workshop*, Delft, 2009, 40 p.
- 8. NPAFC Technical Report 17, Third NPAFC-IYS Virtual Workshop on Linkages between Pacific Salmon Production and Environmental Changes, *npafc.org*, 2021, 220 p., https://npafc.org/wp-content/uploads/ technical-reports/Tech-Report-17-DOI/Technical-Report-17.pdf.
- 9. NPAFC International Year Of Salmon, *yearofthesalmon.org*, 2022, 2 p., https://npafc.org/wp-content/up-loads/Public-Documents/News-Release/2022-NPAFC_IYS-Press-Release.pdf.
- 10. NPAFC Technical Report 18, Virtual Conference on Winter Ecology of Pacific Salmon and Results from the Two Gulf of Alaska Expeditions, *npafc.org*, 2023, 155 p., https://yearofthesalmon.org/wp-content/up-loads/2023/01/Technical-Report-18.pdf.
- Pakhomov E.A., Deeg C., Esenkulova S., Foley G., Hunt B. P.V., Ivanov A., Jung H. K., Kantakov G., Kanzeparova A., Khleborodov A., Neville C., Radchenko V., Shurpa I., Slabinsky A., Somov A., Urawa S., Vazhova A., Vishnu P. S., Waters C., Weitkamp L., Zuev M., Beamish R., Summary of preliminary findings of the International Gulf of Alaska expedition onboard the R/V Professor Kaganovskiy during February 16 – March 18, 2019, *https://npafc.org*, 2019, Article 1858, 25 p.
- 12. Preliminary Results for the 2020 Gulf of Alaska Expedition Announced!, *yearofthesalmon.org*, 2020, 9 p., https://yearofthesalmon.org/preliminary_findings_2020/.