

Сезонная изменчивость уровня, циркуляции и синоптической энергетики Японского моря

О.О. Трусенкова, С.Ю. Ладыченко, Д.Д. Каплуненко, В.Б. Лобанов

Тихоокеанский океанологический институт ДВО РАН,
690041, Владивосток, ул. Балтийская, д. 43
E-mails: trolia@poi.dvo.ru; otrusenkova@mail.ru

Сезонная изменчивость уровня, циркуляции и синоптической энергетики Японского моря исследована путем многомерного статистического анализа альбитметрических данных проекта AVISO за весь доступный период. Поля уровня и вихревой кинетической энергии (ВКЭ) характеризуются взаимосвязанными модами изменчивости: синхронный подъем уровня во всем море, интенсификация циркуляции и синоптической энергетики происходит от весны к осени, обратная фаза развивается от зимы к весне, а сезонные экстремумы достигаются в марте – апреле и октябре – ноябре соответственно. Для генерации ВКЭ в Японском море существенна сдвиговая неустойчивость. Несмотря на то, что средние значения ВКЭ в субарктической части моря на порядок ниже, чем в субтропической, здесь имеются районы со значительной энергетикой за счет повторяемых короткоживущих структур.

Ключевые слова: Японское море, спутниковая альбитметрия, циркуляция вод, вихревая кинетическая энергия, сдвиговая неустойчивость.

Введение

Гидрологический режим Японского моря определяется транзитом субтропических вод от Корейского пролива на юге к проливам Сангарскому и Лаперуза на восточной границе, через которые трансформированные воды покидают море. Теплые воды размещены в субтропическом секторе, который отделяется от холодного субарктического фронтальным разделом. Крупномасштабный меридиональный градиент плотности воды определяет интенсивность циркуляции моря в целом. Субарктический сектор нельзя считать районом только циклонической циркуляции, как это представляется в поле среднего уровня, рассчитанного с помощью гидродинамической модели (рис. 1а), – здесь активно происходит синоптическое вихреобразование (Лобанов и др., 2007).

Интенсивность циркуляции океанов и морей оценивается по данным спутниковой альбитметрии, доступным почти за двадцатилетний период, для чего рассчитывается т.н. вихревая кинетическая энергия (ВКЭ; eddy kinetic energy). Она максимальна в зонах основных течений, таких как Гольфстрим и Курюсио, и над крупномасштабными неоднородностями рельефа дна (Wunsch and Stammer, 1998; Zhai *et al.*, 2008). Значительный годовой ход ВКЭ наблюдается во многих районах Мирового океана, в том числе в северо-западной (СЗ) части Тихого океана и дальневосточных окраинных морях, причем в субтропиках ВКЭ максимальна в конце лета, а в субарктике – зимой (Zhai *et al.*, 2008). В Японском море имеется субтропический и субарктический районы, а рельеф дна характеризуется узким шельфом, крутыми склонами и наличием подводной возвышенности в центральной части (рис. 3а). В этой связи представляет интерес исследование сезонной изменчивости синоптической энергетики Японского моря, что и является целью данной работы.

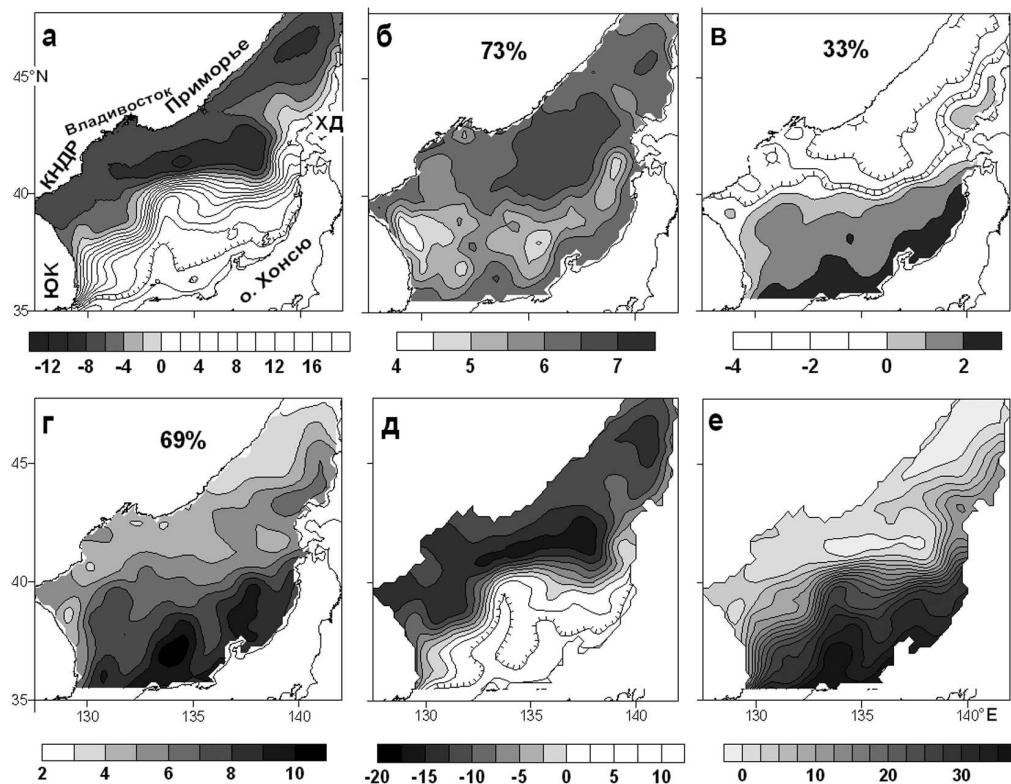


Рис. 1. Характеристики уровня (см) Японского моря: средний уровень, рассчитанный с помощью гидродинамической модели (а); пространственные распределения синхронной (б) моды уровня и моды градиента (в), рассчитанных по нормированным выборкам, а также синхронной моды уровня, рассчитанной по ненормированной выборке (г); вклады в уровень синхронной моды, рассчитанной по ненормированной выборке, для марта (д) и октября (е). Пространственные распределения мод умножены на стандартное отклонение соответствующих ГК; засечки на изолиниях направлены в сторону уменьшения значений; показана доля учитываемой модами дисперсии.

Буквами обозначены: ЮК – Южная Корея, ХД – о. Хоккайдо (а)

Данные и методы

Используются данные проекта AVISO (<http://www.aviso.oceanobs.com/>), свободно доступные в Интернете. Это еженедельные поля аномалий уровня Японского моря, с пространственным разрешением $1/4^\circ$, за период с октября 1992 г. по начало июля 2011 г. Эти поля (т.н. reference data) основаны на измерениях только двух систем спутников – TOPEX/Poseidon (с июня 2002 г. на той же орбите – Jason 1, 2) и ERS 1, 2 (с августа 2003 г. на той же орбите – EnviSAT). Район ограничен 127.5° - 142°E и 35.5° - 48°N ; поскольку ошибки данных увеличиваются на шельфе и вблизи берега, шельфовая часть Татарского пролива к северу от 48°N исключена, интерпретируются структуры, расположенные не ближе, чем в 50 км от берега для аномалий уровня и 60 км для ВКЭ.

К анализу привлекается средняя динамическая топография, рассчитанная с помощью гидродинамической модели (Trusenkov *et al.*, 2009). Она характеризуется резким перепадом уровня через субарктический фронт, депрессией в субарктическом секторе к северу от фронта и высоким стоянием уровня в субтропическом секторе и зоне Цусимского течения вдоль восточного берега моря (рис. 1а).

Для интерпретации мод ВКЭ привлекаются поля термических контрастов, основанные на инфракрасных (ИК) спутниковых изображениях поверхности СЗ части Японского моря по данным NOAA AVHRR в июле – октябре 2000-2010 гг.

ВКЭ рассчитана в геострофическом приближении как $E = (u'^2 + v'^2)/2$ (Wunsch and Stammer, 1998; Zhai *et al.*, 2008). В качестве пульсаций скорости принимаются отклонения от среднего во времени $u' = -(g/f) \cdot \partial\xi/\partial y$ и $v' = (g/f) \cdot \partial\xi/\partial x$, где g – ускорение свободного падения, f – параметр Кориолиса, ξ – аномалия уровня моря, x и y – координаты вдоль круга широты и долготы соответственно. После дифференцирования потребовалось провести сглаживание данных, для чего выполнялась низкочастотная фильтрация на основе вейвлет-преобразования с использованием материнского вейвлета Морле 6-го порядка. Были опробованы периоды отсечения 9, 13 и 20 недель, с близким результатом. Следует отметить, что для моря средних размеров существенны данные системы спутников ERS – EnviSAT, с близко расположенными треками (рис. 6б для района залива Петра Великого) и периодом обращения 35 дней. Поскольку спектр собственных чисел улучшается при увеличении периода отсечения, а частота Найквиста для этих спутников составляет 70 дней, рассматриваются поля, фильтрованные с периодом 20 недель.

Для исследования пространственно-временной изменчивости часто применяется разложение на эмпирические ортогональные функции (ЭОФ). Этот мощный метод имеет существенное ограничение ортогональности получаемых мод изменчивости, что далеко не всегда свойственно структуре данных. Для выявления взаимосвязанных (неортогональных) мод применяются различные подходы, например косоугольное вращение ЭОФ или многомерная классификация. Мы предлагаем простой способ, основанный на последовательных разложениях на ЭОФ по выборкам, получаемым одна из другой удалением вклада ведущей моды перед каждым последующим шагом. Предварительная нормировка выборок на локальное стандартное отклонение (т.е. разложение на основе корреляционных, а не ковариационных матриц) позволяет получать новые моды по усеченным выборкам. Такой подход позволяет исследовать структуру данных без ограничения ортогональности. В применении к ненормированным выборкам эта процедура приводила бы только к последовательному отбрасыванию старших мод.

Сезонные моды уровня Японского моря

Поля уровня Японского моря характеризуются наличием взаимосвязанных (неортогональных) мод изменчивости (Trusenkova *et al.*, 2010; Трусенкова, 2010). Старшая мода, полученная по нормированной выборке и учитывающая 72% дисперсии, описывает синхронные колебания уровня во всем море (рис. 1б). Следующая мода является ведущей по остаточной выборке, полученной удалением вклада синхронной моды. Она учитывает 33% остаточной дисперсии и отражает изменения меридионального градиента уровня, т.е. изменения интенсивности циркуляции в целом (рис. 1в). Две эти моды характеризуются одинаковым годовым ходом (рис. 2), с наивысшим стоянием уровня и обострением градиента в октябре и противоположной фазой в марте. Коэффициент корреляции между временными функциями (главными компонентами – ГК) достигает 0.85.

Разложение на ЭОФ по ненормированной выборке (что имеет смысл делать только один раз) дает синхронную моду с ГК, идентичной своему аналогу по нормированной выборке; коэффициент корреляции достигает 0.998 (рис. 2). Пространственная функция синхронной моды, основанной на ненормированной выборке (рис. 1г), подобна средней динамической топографии (рис. 1а). Эта мода содержит обе старшие моды, полученные по нормированным выборкам, что демонстрируется полями уровня для марта и октября, кото-

рые основаны на среднем модельном уровне и аномалиях, рассчитанных как произведение пространственной функции и средней ГК в эти месяцы. Уровень стоит высоко в октябре и низко в марте, а перепад на субарктическом фронте увеличивается от марта к октябрю (рис. 1д, е). В марте пространственный градиент уровня составляет 9.8×10^{-7} и 10.9×10^{-7} на западном и восточном участках фронта соответственно, а в октябре – 10.3×10^{-7} и 16.0×10^{-7} соответственно. Аналогично, перепад пространственных нагрузок моды градиента уровня на восточном участке фронта выше, чем на западном (рис. 1в).

Однаковый годовой ход синхронной моды и моды градиента указывает на единство порождающих их физических механизмов. Меридиональный градиент уровня и плотности воды определяется термическим воздействием за счет поступления теплых вод через Корейский пролив, где расход возрастает от зимы к осени и максимальен в октябре (Островский и др., 2009), и за счет раннего охлаждения поверхности в субарктическом секторе. Годовой ход интенсивности циркуляции Японского моря воспроизводится гидродинамическими моделями (Trusenkova *et al.*, 2009; Kim and Yoon, 2010).

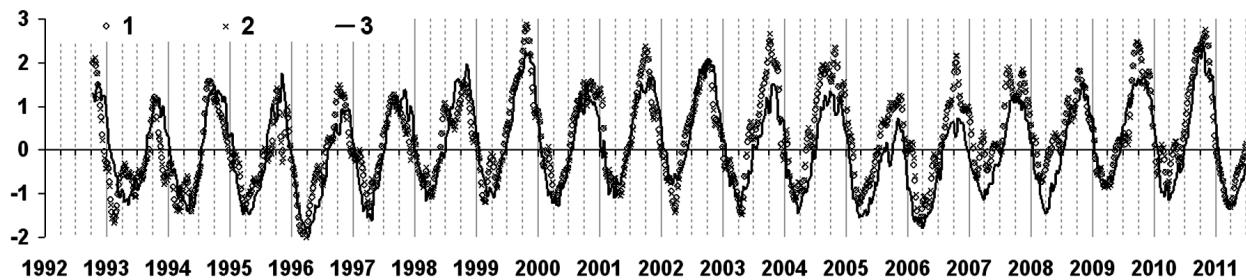


Рис. 2. Нормированные на стандартные отклонения ГК синхронной моды уровня по ненормированной (1) и нормированной (2) выборкам, а также моды градиента уровня (3) по нормированной выборке

Изменчивость вихревой кинетической энергии в Японском море

При анализе ВКЭ следует учитывать, что она не представляет собой энергию вихрей, поскольку в аномалии скорости вносят вклад разные процессы. Разделить вклады синоптических и волновых (мезомасштабных) движений, используя современные альтиметрические данные, затруднительно (Wunsch and Stammer, 1998). Однако вклад изменчивости крупномасштабных течений можно устранить путем предварительного удаления вклада моды меридионального градиента уровня. При расчете усеченных (остаточных) аномалий вычитается также вклад синхронной моды уровня, которая учитывает более 70% дисперсии, хотя вследствие слабой пространственной изменчивости (рис. 1б) почти не вносит вклада в скорость течения.

В обоих случаях различия ВКЭ составляют всего лишь около 5% как в средних величинах, так и в модах изменчивости (рис. 3, 4), а коэффициент корреляции между временными рядами средних по пространству равен 0.98. Это соответствует сложившимся представлениям о том, что максимум кинетической энергии океана приходится на синоптический масштаб (Wunsch and Stammer, 1998). В субтропической части моря средняя ВКЭ почти на порядок превышает значения в субарктическом секторе, причем максимальные значения привязаны к котловинам Цусимской и Хонсю (рис. 3а, г).

Моды ВКЭ оказались неортогональными, как и моды уровня; обсуждаемые ниже первая и вторая моды ВКЭ в действительности являются старшими модами разложений по

двум нормированным выборкам, полученным одна из другой. Эти моды учитывают 15% и ~35% дисперсии соответствующей выборки при расчете как по исходным, так и по остаточным аномалиям уровня, а последующие моды каждого разложения являются вырожденными. Обе моды характеризуются одинаковой временной изменчивостью, соответствующей годовому ходу двух старших мод уровня, а также осредненной по пространству ВКЭ (рис. 4). Экстремумы ВКЭ достигаются в октябре – ноябре и марте – апреле, а парные коэффициенты корреляции между ГК мод ВКЭ и уровня, а также средней по пространству ВКЭ составляют 0.82-0.98.

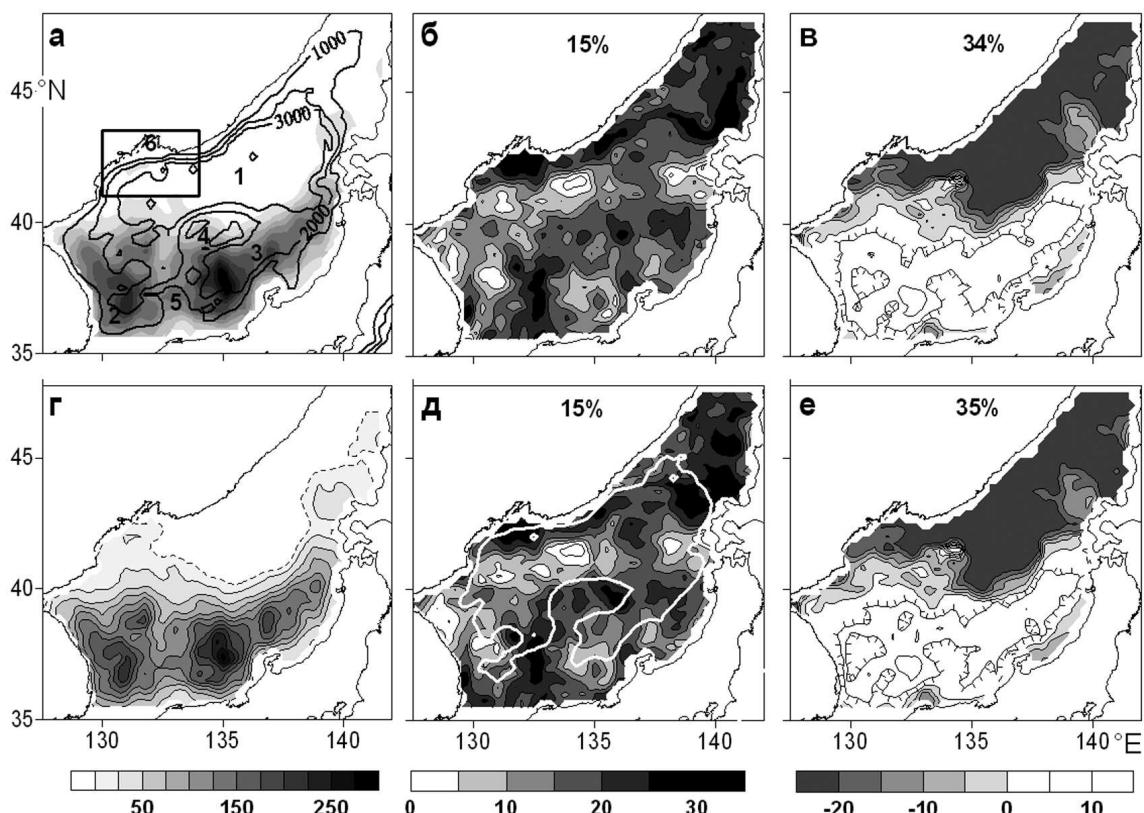


Рис. 3. Характеристики ВКЭ ($\text{см}^2/\text{с}^2$) Японского моря, рассчитанной по исходным (а-в) и остаточным (г-е) аномалиям уровня: средняя ВКЭ (а, г), умноженные на стандартное отклонение соответствующих ГК пространственные распределения мод неустойчивости (б, д) и поправки (в, е). Показаны изобаты 1000, 2000 и 3000 м (а) и 2000 м (д). Засечки на изолиниях направлены в сторону уменьшения значений; показана доля учитываемой модами дисперсии. Цифрами обозначены (а): 1 – Японская котловина, 2 – Цусимская котловина, 3 – котловина Хонсю, 4 – поднятие Ямато, 5 – банка Оки, 6 – залив Петра Великого. Прямоугольником показан район залива Петра Великого, представленный на рис. 6

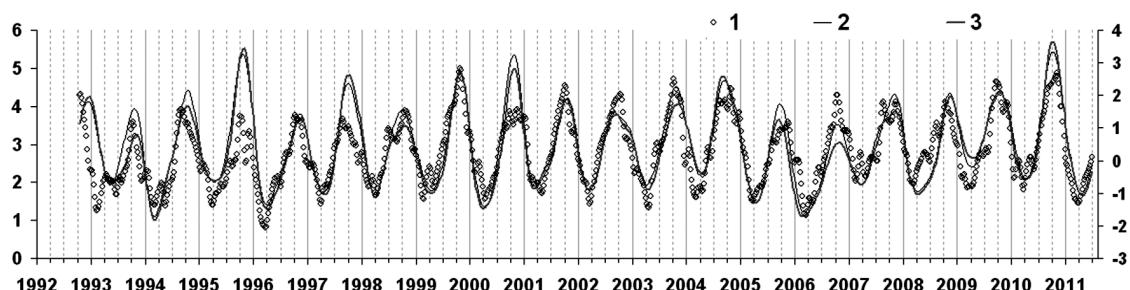


Рис. 4. Средняя ВКЭ (1; $\text{см}^2/\text{с}^2$; ось у справа) и нормированные на стандартные отклонения ГК моды неустойчивости (2; ось у слева) и поправки (3; ось у слева)

Средняя ВКЭ в субарктическом секторе на порядок ниже, чем в субтропическом, но пространственные максимумы старшей моды привязаны к динамическим и батиметрическим структурам во всем море (рис. 3). Они расположены в северо-восточной (СВ) части моря (в районе к западу от о. Хоккайдо), где от потока Цусимского течения, следующего вдоль Японских островов, отделяется западная ветвь, в зоне Приморского течения, в районе отрыва Восточно-Корейского течения от берега (в юго-западной – ЮЗ – части моря) и в зоне, пересекающей поднятие Ямато, где сосредоточены траектории приповерхностных дрифтеров (Lee and Niiler, 2005). Максимумы также расположены над банкой Оки в южной части моря, над западным и СВ склонами поднятия Ямато, над широкой шельфовой зоной к западу от о. Хоккайдо, над СВ склоном Японской котловины и склоном у побережья Приморья (рис. 3).

Пространственная изменчивость соответствует известным механизмам генерации ВКЭ за счет гидродинамической неустойчивости течений и взаимодействия потока с рельефом дна (Wunsch and Stammer, 1998), что позволяет назвать эту моду модой неустойчивости. Генерация ВКЭ связывается с бароклинной неустойчивостью (Zhai *et al.*, 2008), но синхронность годовой ход интенсивности крупномасштабной циркуляции Японского моря и ВКЭ указывает на существенный вклад сдвиговой неустойчивости. Вторая мода ВКЭ является поправкой, необходимой для схождения к среднему. Ее пространственно однородное субарктическое ядро (рис. 3в, е) уменьшает ВКЭ, не искажая структуры, описываемой модой неустойчивости.

Для исследования межгодовой изменчивости ВКЭ проведена низкочастотная фильтрация с периодом отсечения 1.2 года. Две старшие моды разложения по этой выборке относятся к экстремальным событиям 2003 г. и 2000 г., а в остальные годы величина ГК мала. В теплые месяцы 2003 г. в ЮЗ части моря наблюдался необычно крупный и долгоживущий теплый вихрь, а с июня по ноябрь 2000 г. Восточно-Корейское течение, наоборот, отсутствовало, а теплые воды из Корейского пролива уходили на восток к побережью о. Хонсю (Chang *et al.*, 2004). Эти события проявляются и в изменчивости уровня (Trusenkova *et al.*, 2010). Пространственные распределения низкочастотных мод ВКЭ не соответствуют сезонным модам и плохо интерпретируются, что говорит о «крыхлой» структуре данных и слабой, в целом, межгодовой изменчивости.

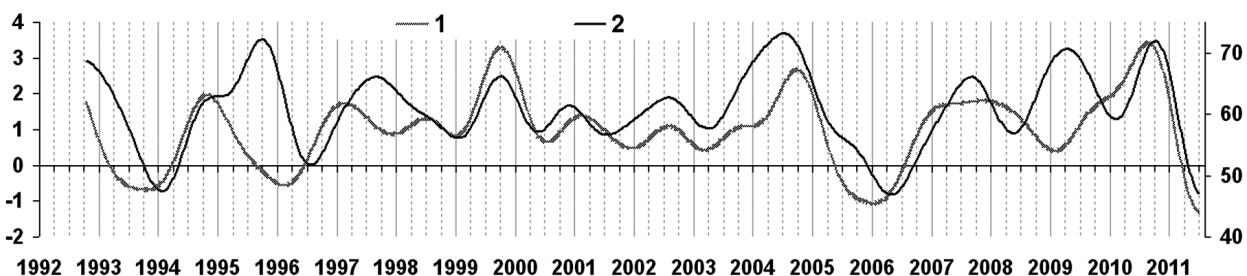


Рис. 5. Нормированная на стандартное отклонение ГК синхронной моды низкочастотных аномалий уровня (1; левая ось y ; по работе Трусенкова, 2010) и низкочастотная средняя по пространству ВКЭ (2; $\text{см}^2/\text{с}^2$; правая ось y)

Обращает на себя внимание сходство низкочастотной средней ВКЭ (рис. 5, кривая 2) с ГК межгодовой синхронной моды уровня, полученной по фильтрованной выборке (Трусенкова, 2010; рис. 5, кривая 1). Коэффициент корреляции между этими временными рядами статистически значим на уровне 95% и составляет 0.54 для всего периода и 0.61 с серединой

1996 г. по начало 2008 г. Межгодовые колебания уровня связаны с дисбалансом расходов воды в проливах (Трусенкова, 2010). Заметное повышение уровня наблюдалось в 1999 г., когда расход в Корейском проливе был максимальен (Островский и др., 2009), а в период малого расхода в 2005 г. происходило понижение. Изменения расхода в Корейском проливе, в свою очередь, воздействуют на течения и ВКЭ в южной части моря, изменяя ее среднюю величину, но не порождая межгодовых мод изменчивости. Заметное расхождение уровня и ВКЭ в 1995 и 2009 гг., возможно, связано с изменениями расхода в проливах субарктической части моря – Сангарском и Лаперузом.

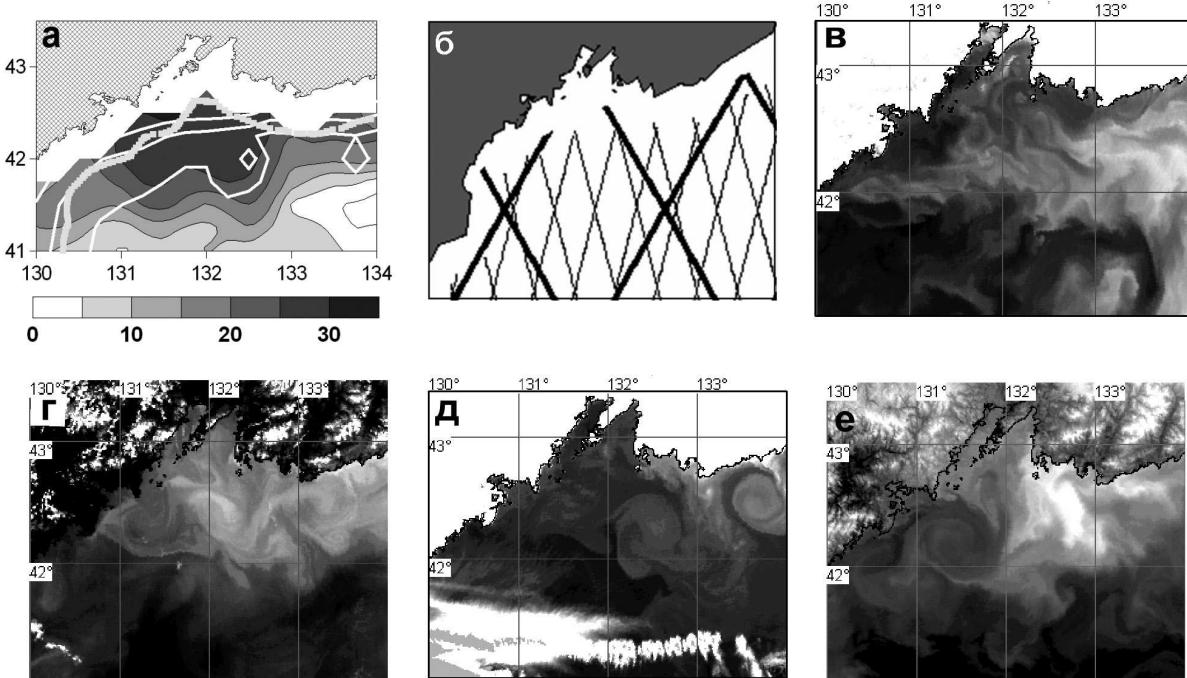


Рис. 6. Фрагмент пространственной структуры моды неустойчивости ($\text{см}^2/\text{s}^2$) в районе залива Петра Великого (а); треки спутников TОPEX/Poseidon и Jason 1, 2 – жирными линиями, спутников ERS 1, 2 и EnviSAT – тонкими линиями (б); термические контрасты на ИК изображениях района за 21.09.2006 (в), 17.08.2008 (г), 18.09.2008 (д), 22.09.2009 (е). Светло-серой линией показана граница 60-км прибрежной зоны, белыми контурами – изобаты 1000, 2000 и 3000 м (а). Светлый тон соответствует холодным водам, темный – теплым (б-е)

Синоптические структуры в районе залива Петра Великого

Мода неустойчивости имеет локальный максимум в районе залива Петра Великого (рис. 6а). Этот район, включающий обширную (для Японского моря) шельфовую зону залива, крутой склон и подводную г. Сибирь (132.5°E , 42°N), в достаточной мере освещен данными системы спутников ERS/EnviSAT (рис. 6б). На ИК изображениях района наблюдаются разнообразные синоптические структуры. Летом и осенью теплые воды находятся на шельфе и подходят со стороны открытого моря, а над склоном следует на юго-запад холодное Приморское течение. Гидродинамическая неустойчивость приводит к распаду течения на отдельные струи, взаимодействующие с прибрежными и мористыми вихрями (рис. 6в, г); может наблюдаться разрыв течения, когда весь район заполнен теплыми водами (рис. 6д). Над склоном может формироваться один крупный вихрь или несколько взаимодействующих вихрей меньшего размера (Ладыченко, 2002; Лобанов и др., 2007). В октябре и ноябре, под воздействием сильных СЗ ветров, у восточного побережья залива развивается

апвеллинг. При наличии крупного вихря, холодные струи, отрывающиеся от прибрежной зоны и пересекающие склон в районе г. Сибирь, следуют вдоль восточной периферии вихря и затягиваются к его центру (рис. 6е).

Как показал анализ многолетнего архива ИК изображений, обычно формируется от 1 до 5 вихрей в месяц, размеры варьируют от 20 до 100 км, время жизни составляет от 5-7 дней для маленьких вихрей (с диаметром 20-30 км) до 1-1.5 месяцев для крупных вихрей (с диаметром >50 км). В фильтрованных полях ВКЭ сохраняется изменчивость с периодами больше 2-4 месяцев, что существенно превышает время жизни отдельных структур. Это означает, что мода неустойчивости описывает не отдельные синоптические структуры района, а соответствует их высокой повторяемости.

Заключение

Поля уровня и ВКЭ в Японском море характеризуются взаимосвязанными модами изменчивости: синхронный подъем уровня во всем море, интенсификация циркуляции и синоптической энергетики происходят от весны к осени, обратная фаза развивается от зимы к весне, а сезонные экстремумы достигаются в марте – апреле и октябре – ноябре соответственно. В генерацию ВКЭ в Японском море значительный вклад вносит сдвиговая неустойчивость. Несмотря на то, что средние значения ВКЭ в субарктической части моря в несколько раз ниже, чем в субтропической, здесь имеются районы значительной энергетики за счет повторяемых короткоживущих структур.

Литература

1. Ладыченко С. Ю. Изменение термической структуры поверхностных вод у побережья Приморья в осенний период 2000 г. // Океанологические исследования: сб. статей по мат. конф. молодых ученых ТОИ ДВО РАН (27–30 ноября 2001 г.). Владивосток: Дальнаука, 2002. С. 75-83.
2. Лобанов В.Б., Пономарев В.И., Салик А.Н. и др. Структура и динамика синоптических вихрей северной части Японского моря // Дальневосточные моря России: в 4 кн. Кн. 1: Океанологические исследования. М.: Наука, 2007. С. 450-473.
3. Островский А.Г., Фукудоме К., Юн. Дж.-Х., Такикава Т. Изменчивость водообмена через Корейский (Цусимский) пролив по данным измерений судовым акустическим доплеровским профилографом течений в 1997-2007 гг. // Океанология. 2009. № 3. С. 368-380.
4. Трусенкова О.О. Моды низкочастотной изменчивости уровня Японского моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2010. Т. 7. № 1. С. 286-296.
5. Chang K.I., Teague W.J., Lyu S.J., et al. Circulation and currents in the southwestern East/Japan Sea: Overview and review // Progress in Oceanography. 2004. V. 61. N. 2-4. P. 105-156.
6. Lee D.-K., Niiler P.P. The energetic surface circulation patterns of the Japan/East Sea // Deep Sea Research, Part II. 2005. V. 52. № 11-13. P.1547-1563.
7. Kim T.-K., Yoon J.-H. Seasonal variation of upper layer circulation in the Northern part of the East/Japan Sea // Continental shelf research. 2010. V. 30. № 12. P. 1283-1301.
8. Trusenkova O., Kaplunenko D., Gulenko T., et al. Variability of the sea level in the Japan/East Sea, estimated from AVISO altimetry // Pacific Oceanography. 2010. № 1. P. 31-43.
9. Trusenkova O.O., Nikitin A.A., Lobanov V.B. Circulation features in the Japan/East Sea related to statistically obtained wind patterns in the warm season // J. Mar. Sys. 2009. V. 78. № 2. P. 214-225.
10. Wunsch C., Stammer D. Satellite altimetry, the marine geoid, and the oceanic general circulation // Annu. Rev. Earth Planet. Sci. 1998. V. 26. № 1. P. 219-253.
11. Zhai X., Greatbatch J., Kohlmann J.-D. On the seasonal variability of eddy kinetic energy in the Gulf Stream region // Geophys. Res. Lett. 2008. V. 35. № 24. L24609. DOI: 10.1029/2008GL036412.

Seasonal variation of sea level, circulation, and eddy kinetic energy in the Japan Sea

O.O. Trusenkova, S.Yu. Ladychenko, D.D. Kaplunenko, V.B. Lobanov

*V.I. Il'ichev Pacific Oceanological Institute FEB RAS
690041 Vladivostok, 43 Karbysheva Str.
E-mail: trolia@poi.dvo.ru*

Seasonal variation of sea level, circulation, and eddy kinetic energy in the Japan Sea is by using AVISO altimetric sea level anomalies. Sea level and eddy kinetic energy (EKE) are characterized by interacting modes of variability: synchronous sea level rise in the entire Sea, circulation intensification, and EKE increase occur from spring through fall and the reverse phase develops from winter through spring, with the seasonal extremes taking place in March – April and October – November, respectively. Shear instability is important for EKE generation in the Japan Sea. Despite the fact that mean EKE in the subarctic sector is an order of magnitude lower than in the subtropical area, there are zones of the increased EKE north of the subarctic front due to frequent short-lived mesoscale structures.

Keywords: the Japan Sea, satellite altimetry, sea circulation, eddy kinetic energy, shear instability.