

## Динамика Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии

С.А. Лебедев<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> *Геофизический центр РАН, Москва, 119296, Россия*

*E-mail: lebedev@wdcb.ru*

<sup>2</sup> *Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия*

*E-mail: sergey\_a\_lebedev@mail.ru*

Работа посвящена исследованию изменчивости динамики Каспийского моря по данным спутниковой альтиметрии. Рассматривается методика расчета синоптической динамической топографии (ДТ) моря как суперпозиция средней климатической ДТ, рассчитанной по термогидродинамической модели Гидрометцентра РФ, и поля аномалий уровня моря, рассчитанного по данным спутниковой альтиметрии. Представлены результаты анализа среднемесячных полей ДТ и геострофических скоростей. Анализ завихренности поля геострофических течений подтвердил преобладание циклонической циркуляции в Северном и Среднем Каспии и антициклонической – в Южном. После 2008 г завихренность почти во всех частях моря увеличилась, что говорит об изменении режима атмосферной циркуляции над акваторией Каспийского моря. Совместный анализ изменчивости среднегодовых величин скоростей течений и завихренности поля течений показывает, что средние скорости течений обратно зависимы от завихренности. Начиная с 1993 по 2007 г. завихренность поля течений падала со скоростью  $-0,17 \pm 0,02 \times 10^{-7}$  в год, а модуль скорости рос  $+0,11 \pm 0,06$  см/с в год. После 2008 г. ситуация перевернулась на противоположную. Завихренность поля течений росла со скоростью  $+0,75 \pm 0,12 \times 10^{-7}$  в год, а модуль скорости падал  $-0,47 \pm 0,19$  см/с в год.

**Ключевые слова:** Каспийское море, динамика, дистанционное зондирование, спутниковая альтиметрия, завихренность, режим циркуляции

### Введение

Каспий является внутренним морем, расположенным в обширной материковой депрессии на границе Европы и Азии. Это крупнейший замкнутый водоем мира, и только изоляция от Мирового океана отличает его от внутренних и окраинных морей. Все остальные признаки водоема: размеры, глубины, особенности термохалинной структуры и циркуляции вод – позволяют отнести его к типу глубоких внутренних морей (Зонн и др. 2013).

Одна из главных отличительных особенностей Каспийского моря – значительная изменчивость его гидрометеорологических и гидродинамических режимов, на которые влияют как естественные, так и антропогенные факторы. В настоящее время большое внимание уделяется экологическому состоянию Каспийского моря, которое связано в первую очередь с интенсивным развитием добычи нефти на его акватории (Зонн, Жильцов, 2008).

Особенно актуальным является задача исследования динамики Каспийского моря, которая дает возможность провести оценки трансграничного переноса загрязняющих веществ, прогнозировать развитие внештатных ситуаций на нефтедобывающих платформах и портах. Помимо инструментальных измерений скоростей течений, которые носят эпизодический характер (Каспийское море, 1986; 1990; Гидрометеорология и гидрохимия морей..., 1992), и результатов математического моделирования (Линейкин, Фельзенбаум, 1955; Саркисян и др., 1976; Тужилкин и др., 1997; Попов, 2004; Ибраев, 2008; Кныш и др., 2008), в последнее время для решения данной задачи активно исполь-

зуются данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) из космоса (Лаврова и др., 2011). Однако спутниковая радиометрия в видимом, ИК и СВЧ диапазонах дает только качественное описание динамики моря, так как затруднены получение и анализ последовательных спутниковых изображений. Задача обработки данных радиолокационного зондирования радаром с синтезированной апертурой (РСА) для анализа циркуляции вод на сегодня еще не решена. Поэтому спутниковая альтиметрия, которая дает цифровую величину высоты морской поверхности (ВМП), позволяет исследовать изменчивость динамики Каспийского моря с высокой точностью (Лебедев, Костяной, 2005; Лебедев, 2013).

### Данные спутниковой альтиметрии

Для анализа гидродинамического режима Каспийского моря наиболее оптимальными являются данные спутников TOPEX/Poseidon (Т/Р) и Jason-1/2 (J1/2). Это обусловлено следующими причинами:

- точность измерения высоты спутника над морской поверхностью для этих программ составляет 1,7 см, а расчет самой ВМП относительно отсчетного эллипсоида для открытого океана – 4,2 см (Лебедев, Костяной, 2005; Kouraev et al., 2011), что является наилучшей характеристикой по сравнению с другими программами альтиметрических измерений.
- временной масштаб повторения измерений вдоль трека – 9,916 суток (т.е. примерно 3 раза в месяц) – наиболее приемлем для исследования синоптической и сезонной изменчивости уровня Каспийского моря.
- внутри каждого цикла на акватории Каспийского моря расположено 4 нисходящих (четные номера) и 4 восходящих (нечетные номера) трека (рис. 1а).
- пространственное разрешение альтиметрических измерений этих спутников для акватории Каспийского моря меньше характерного радиуса деформации Россби 7,5–10 км (Каспийское море, 1986).
- массив данных спутника Т/Р (Benada, 1997) представляет собой непрерывный и наиболее длинный по времени ряд измерений с возможностью его продления данными спутника J1 (Picot et al., 2008) и J2 (Dumont et al., 2011). Расположение треков последнего полностью совпадает с расположением треков спутников Т/Р и J1 до совершения ими маневра коррекции орбиты соответственно 19 августа 2002 г. и 26 января 2009 г. (рис. 1б).

Обработка данных спутников Т/Р и J1/2 проводилась с применением программного обеспечения Интегрированной базы данных спутниковой альтиметрии (ИБДСА) – «Каспий» с учетом всех необходимых поправок (поправки на влажность, сухой поправки, ионосферной поправки, систематической поправки и т.д.) (Лебедев, Костяной, 2005).

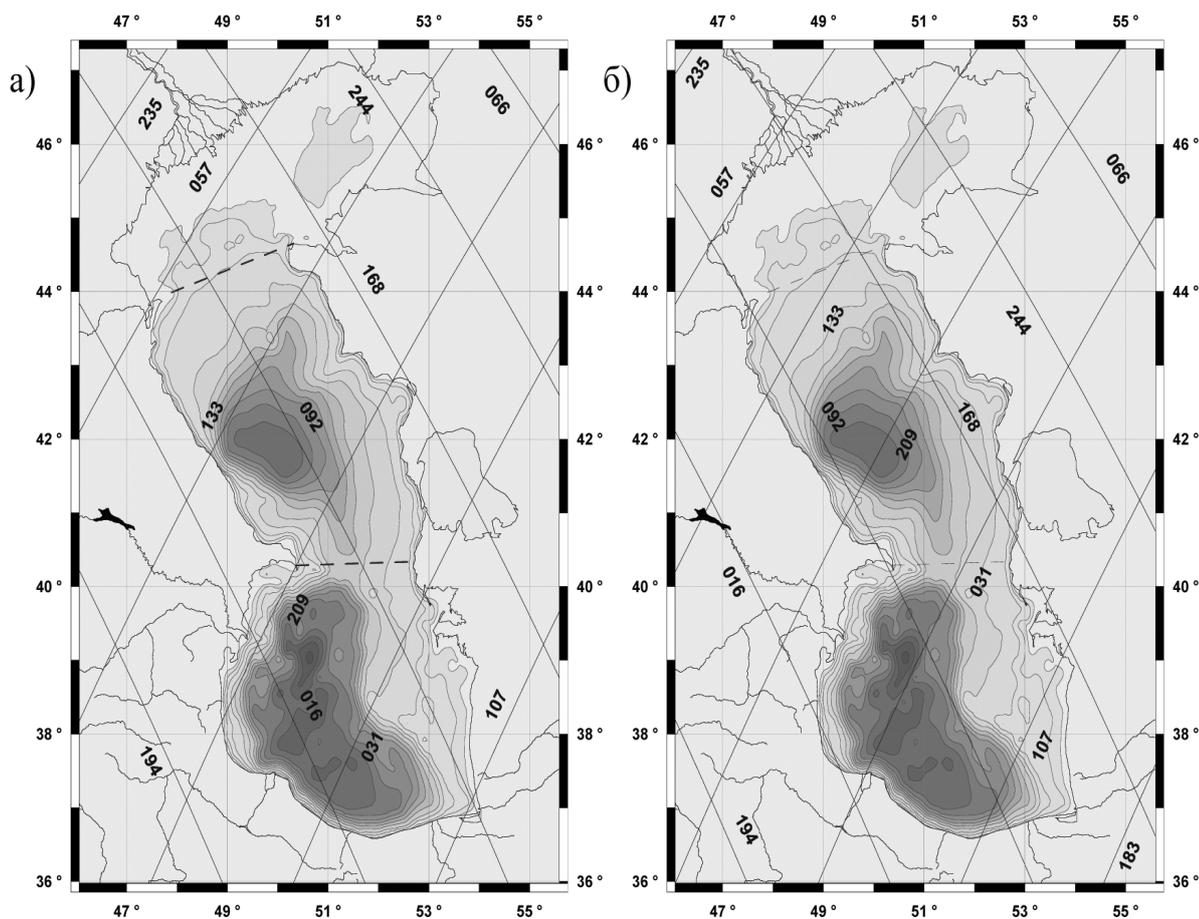


Рис. 1. Положение на акватории Каспийского моря треков фазы А программы спутников Т/Р и J1/2 (а) и фазы В программы спутников Т/Р и J1 (б). Восходящий трек соответствует нечетному номеру, нисходящий трек – четному. Здесь и далее береговая линия соответствует 1934 г., когда отметка уровня моря составляла -26,46 м относительно Балтийской системы высот (от нуля Кронштадтского футштока)

### Модель средних высот морской поверхности

Для анализа динамики моря по данным спутниковой альтиметрии необходимо рассчитать аномалии высоты морской поверхности или аномалии уровня моря (учитывается величина прилива) относительно средней высоты морской поверхности (СВМП). Не все существующие на сегодня глобальные модели СВМП Мирового океана (Tapley, Kim, 2001; Лебедев, Костяной, 2005) включают акваторию Каспийского моря. При вычислении СВМП всегда автоматически учитываются приливные поправки и/или поправки обратного барометра. Для Каспийского моря такой метод не подходит, поэтому необходимо создание региональной модели СВМП с учетом особенностей его гравитационного поля, гидрологического (сильная межгодовая изменчивость уровня моря) и термогидродинамического режимов. Исходя из определения СВМП как поверхности, наиболее приближенной к эквипотенциальной поверхности моря, региональная модель СВМП для Каспийского моря представляет собой функцию не только широты и долготы, но и времени с фильтрацией сезонной и си-

ноптической изменчивости (Лебедев, Костяной, 2005; Lebedev, 2012; Лебедев, 2012). Пространственно-временной анализ изменчивости СВМП Каспийского моря показал, что уровень моря за период с 1993 по 2012 гг. рос и падал неравномерно по акватории моря (рис. 2). Расчет аномалий уровня моря относительно региональной модели СВМП позволит учесть как межгодовую изменчивость уровня моря, так и его пространственную неоднородность.

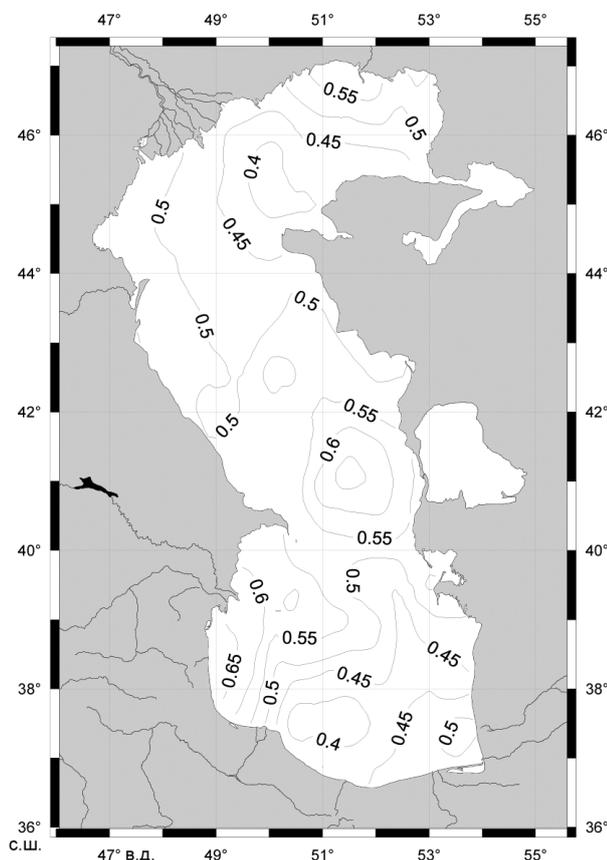


Рис. 2. Нормированные скорости изменения уровня Каспийского моря по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J1/2 с января 1993 г. по декабрь 2012 г.

### Динамическая топография

Исследование динамики Мирового океана, внутренних и окраинных морей проводится на основе анализа динамической топографии (ДТ), которая определяется как отклонение высоты морской поверхности от высоты морского геоида (Лебедев, Костяной, 2005).

Различают два вида динамической топографии: среднюю (или среднеклиматическую) и синоптическую. Среднеклиматическая ДТ определяется как отклонение средней высоты морской поверхности от высоты морского геоида. Она рассчитывается по данным спутниковой альтиметрии, дрейфующих буев и результатам расчетов по термогидродинамическим моделям. Различают глобальные и региональные модели среднеклиматической ДТ. В качестве среднеклиматической ДТ для акватории Каспийского моря наиболее оптимальными являются

результаты расчетов по модели Гидрометцентра (Попов, 2004). Синоптическая динамическая топография (рис. 3в) определяется как суперпозиция среднеклиматической ДТ (рис. 3а) и аномалий уровня, рассчитанным по данным спутниковой альтиметрии (рис. 3б) (Сирота и др., 2004; Лебедев, Костяной, 2005). Знак минус (рис. 3) обусловлен следующей причиной. При моделировании динамики океана принято считать, то вертикальная ось направлена к центру Земли, а при проведении альтиметрических измерений ВМП и расчете ее аномалий вертикальная ось направлена от центра Земли. По этой методике проводились расчеты среднемесячных и среднесезонных полей синоптической ДТ для временного интервала 1993–2012 гг.

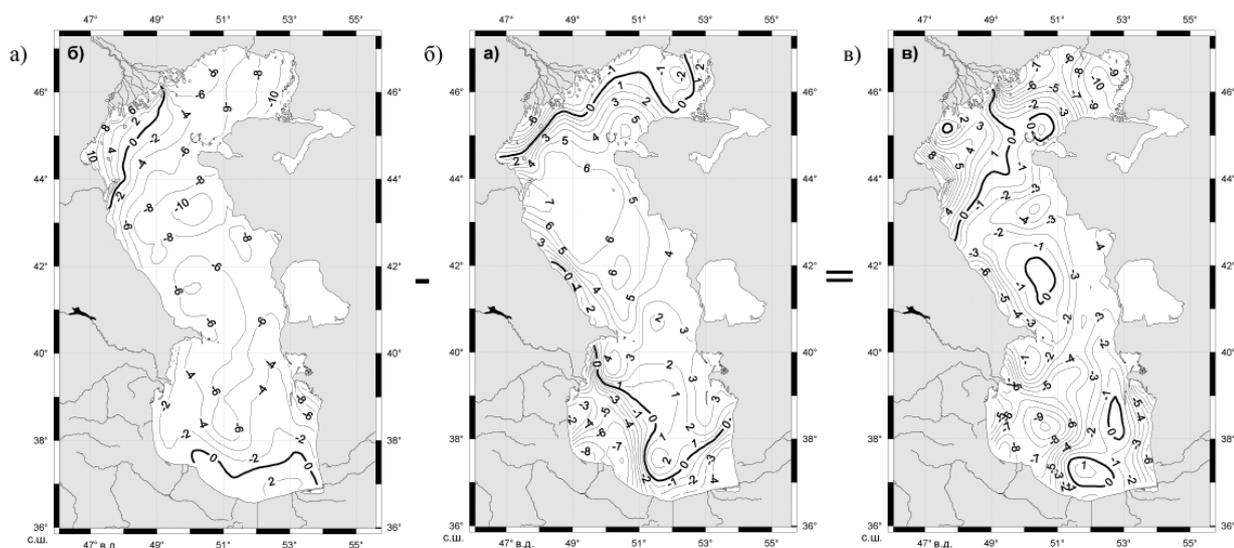


Рис. 3. (а) – Среднеклиматическая ДТ (см), рассчитанная по модели Гидрометцентра России (Попов, 2004); (б) – среднемесячные аномалии уровня моря Каспийского моря (см) за июль 2005 г. и (в) – синоптическая ДТ (см) за июль 2005 г., определяемая как суперпозиция среднеклиматической ДТ и аномалий уровня моря

### Верификацию полей синоптической динамической топографии

Верификацию полей синоптической ДТ, построенной по данным спутниковой альтиметрии можно провести по другим параметрам состояния морской поверхности (температуре поверхности моря, концентрации взвешенного вещества, содержанию хлорофилла и др.), рассчитанным по данным ДЗЗ, которые являются естественными трассерами, отражающими особенности мезомасштабной динамики вод (Лаврова и др., 2011).

Рассмотрим случай аномального цветения водорослей *Cyanobacteria Nodularia* у Иранского побережья в Южном Каспии в 2005 г. (Kopelevich et al., 2008). Оно начало развиваться во второй декаде августа и продолжалось до конца сентября и охватило область в 20 000 км<sup>2</sup>. Аномальное цветение водорослей было зарегистрировано по данным спектрорадиометра MODIS спутника Aqua 12 августа и достигло максимума 1 сентября 2005 г. (рис. 4).

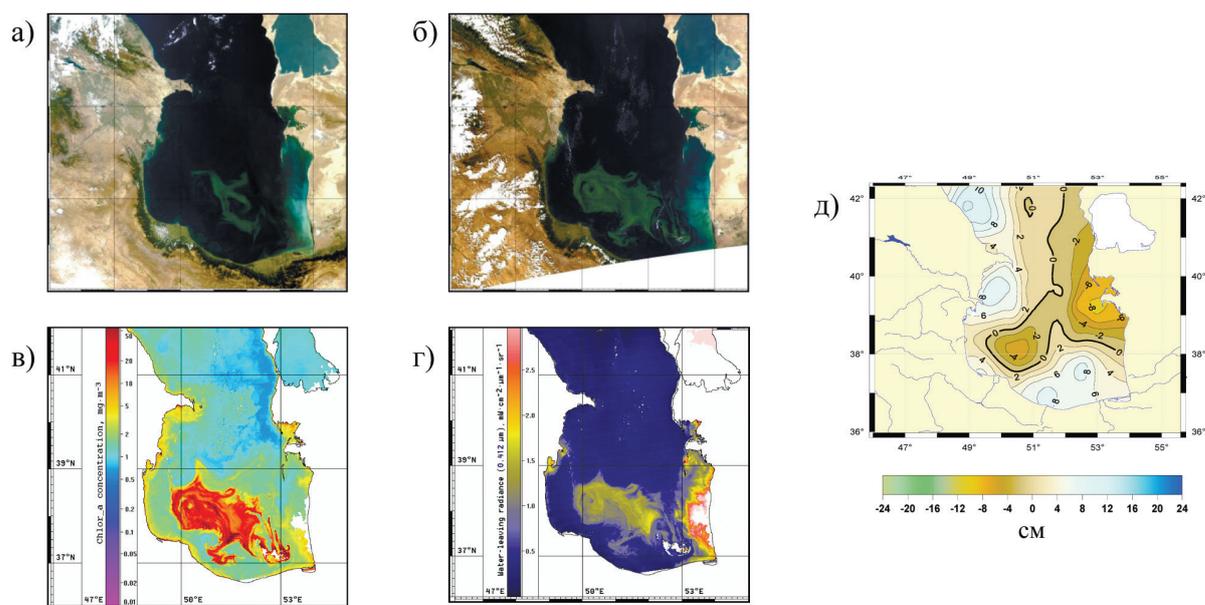


Рис. 4. Аномальное цветение водорослей по данным спектрорадиометра MODIS спутника Aqua (а) на 17 августа 2005 г.; (б) на 1 сентября 2005 г.; карты (в) концентрации хлорофилла ( $\text{мг}/\text{м}^3$ ); (г) восходящего излучения морской воды на длине волны 412 нм ( $\text{мВт}/\text{см}^2$ ) на 1 сентября 2005 г.; (д) среднемесячной синоптической ДТ (см) за август 2005 г., рассчитанной по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J1/2

Анализ карт концентрации хлорофилла и восходящего излучения морской воды (длина волны 412 нм) на 1 сентября 2005 г. по данным спектрорадиометра MODIS спутника Aqua показывает наличие мощного антициклонического вихря в Южном Каспии, центр которого имеет координаты  $50^{\circ}28'$  в.д. и  $38^{\circ}09'$  с.ш. Этот вихрь наблюдается и в поле среднемесячной за август 2005 г. синоптической ДТ, рассчитанной по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J1. Однако форма этого вихря более сглажена по сравнению с картами, рассчитанными по данным спектрорадиометра MODIS. Этот факт можно объяснить пространственным разрешением данных. Для концентрации хлорофилла и восходящего излучения морской воды, рассчитанным по данным спектрорадиометра MODIS, пространственное разрешение составляет 250 м, а для поля среднемесячной синоптической ДТ – 12,5 км.

Таким образом, показано, что поля синоптической ДТ, рассчитанные по данным альтиметрических измерений по алгоритму, изложенному выше, хорошо отражают особенности мезомасштабной динамики вод Каспийского моря.

### Анализ среднемесячных полей динамической топографии

Анализ среднемесячных полей ДТ показывает, что в феврале (рис. 5а) циклонический вихрь, расположенный в северной части Среднего Каспия, становится более мощным по сравнению со среднеклиматической картиной (рис. 3а) и незначительно смещается

в сторону западного побережья. В Южном Каспии также происходит усиление циклонического круговорота в центре. В Среднем Каспии вдоль побережья Дагестана от Аграханского п-ва до Дербента и в Южном Каспии на побережье Туркменского залива и южнее наблюдается интенсификация прибрежных течений. Весной (апрель) (рис. 5б) циклонический вихрь в северной части Среднего Каспия ослабевает. Севернее Апшеронского порога формируется антициклонический вихрь. Циклонический круговорот в центре Южного Каспия также ослабевает по сравнению со среднеклиматической картиной (рис. 3а).

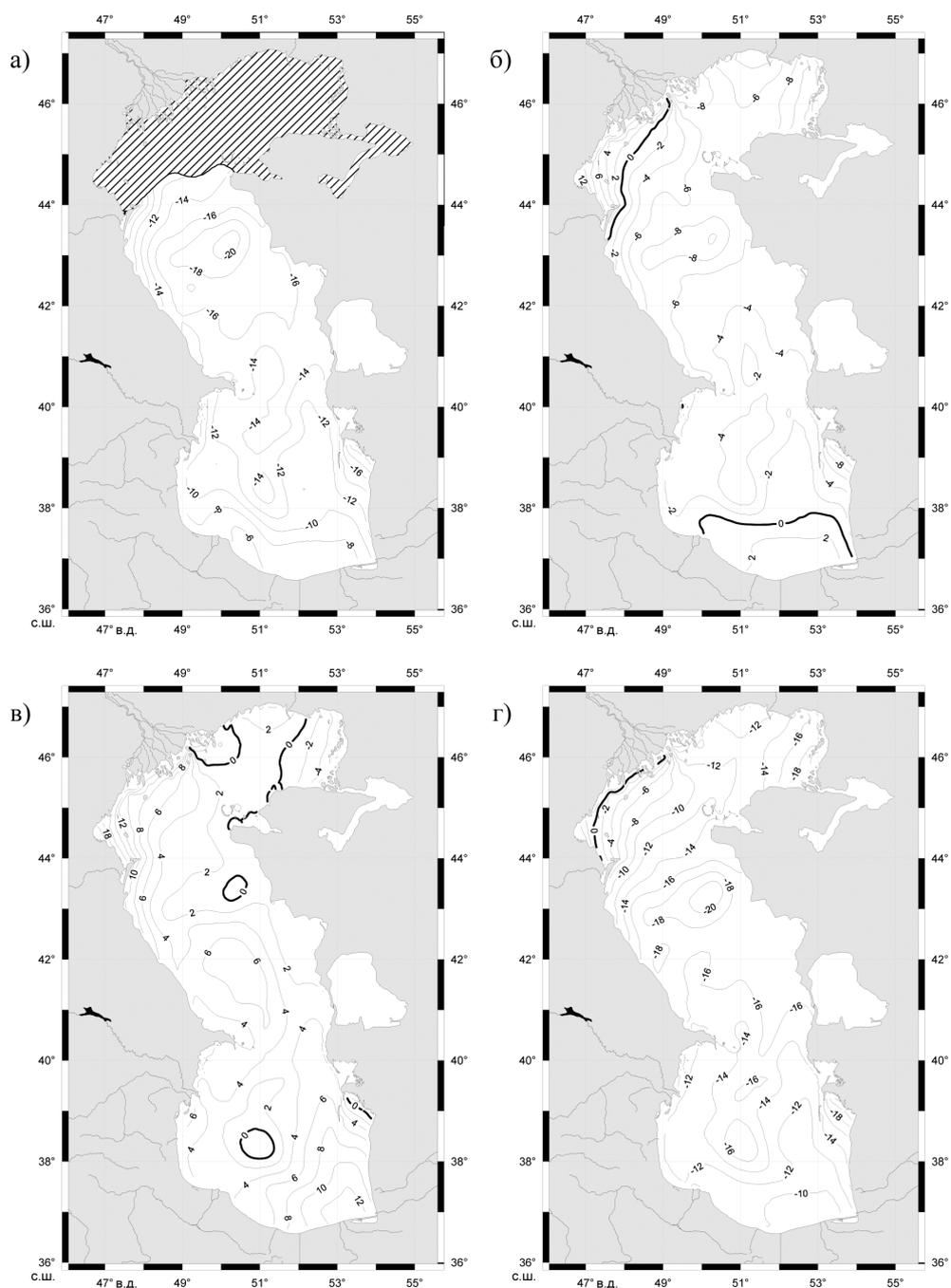


Рис. 5. Среднесезонная синоптическая ДТ Каспийского моря (см) в феврале (а), апреле (б), августе (в) и ноябре (г) по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J1/2 за период с января 1993 г. по декабрь 2012 г.  
Штриховкой показана область льда в суровые зимы

Интенсификация прибрежных течений наблюдается в Северном Каспии от восточной части дельты реки Волга до Махачкалы. Летом (август) (*рис. 5в*) циклонический вихрь в северной части Среднего Каспия ослабевает еще сильнее, а сформировавшийся весной антициклон усиливается и занимает почти всю юго-западную часть. В Южном Каспии циклонический круговорот ослабевает, и в этой части моря преобладает антициклоническая циркуляция. По-прежнему в Северном Каспии от восточной части дельты реки Волга до границы со Средним Каспием наблюдаются сильные прибрежные течения. В ноябре (*рис. 5в*) общая картина циркуляции Каспийского моря близка к среднеклиматической (*рис. 3а*).

Спутниковая альтиметрия дает уникальные возможности для исследования океанологических полей в широком диапазоне пространственно-временных масштабов. Не только позволяет возможность получать непрерывную информацию о поле синоптической ДТ, но и открывает перспективы оценки полей скоростей течений на поверхности. Из уравнений геострофического баланса (Педлоски, 1984; Гилл, 1986), когда горизонтальный градиент давления компенсируется силой Кориолиса, по градиентам динамической топографии  $\partial h_{dyn}$  определяют скорости течений:  $U_g = -\frac{g}{f} \frac{\partial h_{dyn}}{\partial y}$  и  $V_g = \frac{g}{f} \frac{\partial h_{dyn}}{\partial x}$ , где  $U_g$  и  $V_g$  – составляющие скорости течения на поверхности по осям  $0x$ ,  $0y$  в декартовой системе координат;  $g = 9,80665 \text{ м/с}^2$  – ускорение свободного падения;  $f = 2\Omega \sin \varphi$  – параметр Кориолиса, определяемый через угловую скорость вращения Земли вокруг оси  $\Omega = 7,2921 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$  и широту места  $\varphi$ .

Анализ среднемесячных геострофических скоростей течений на поверхности показывает, что максимальные среднемесячные скорости ( $7,5 \pm 0,5 \text{ см/с}$ ) наблюдаются в Северном Каспии, а минимальные ( $4,6 \pm 0,1 \text{ см/с}$ ) – в Южном Каспии. В Среднем Каспии и в море в целом среднемесячные скорости почти совпадают.

Сезонный ход скоростей течений в Северном и Среднем Каспии находятся в противофазе. Когда в апреле в северной части моря наблюдается максимум  $8,1 \text{ см/с}$ , в средней части – минимум  $4,3 \text{ см/с}$ . В июле ситуация изменяется на противоположную. В Среднем Каспии наблюдается максимум  $4,8 \text{ см/с}$ , в Северном – минимум  $6,9 \text{ см/с}$ . Следующий максимум скоростей течений в северной части моря  $8,2 \text{ см/с}$  наблюдается в ноябре, а минимум в средней части  $4,5 \text{ см/с}$  – в сентябре.

Межгодовая изменчивость среднемесячных скоростей геострофических на поверхности показывает значительные межгодовые различия (*рис. 6*). Так в Северном Каспии в 1994, 2000, 2002, 2004, 2007 и 2008 гг. наблюдаются максимальные значения среднемесячных скоростей течений (более  $15 \text{ см/с}$ ) относительно среднеклиматической величины ( $12,9 \pm 1,9 \text{ см/с}$ ). В Среднем Каспии только в 1998 г. наблюдался аномальный максимум величины среднемесячных скоростей течений (более  $12 \text{ см/с}$ ), а в Южном Каспии – в 1997 г. (более  $11 \text{ см/с}$ ) и в 2004 г. (более  $15 \text{ см/с}$ ).

Среднеклиматические величины среднемесячных скоростей течений для этих частей моря составили соответственно  $9,3 \pm 1,1 \text{ см/с}$  и  $8,8 \pm 1,5 \text{ см/с}$ , что близко к величинам для всего моря в целом  $10,1 \pm 1,2 \text{ см/с}$ . На *рис. 6* хорошо видно, что в 1997 и 1998 гг., а также в 2003 г.

временной ход среднемесячных скоростей во всех частях моря наиболее синхронен, что говорит об особенном режиме циркуляции моря в эти временные интервалы. После 2009 г. произошло резкое падение среднемесячных скоростей во всех частях моря в пределах от 1–2 см/с, что, судя по всему, связано с изменениями режима циркуляции атмосферы в данном регионе.

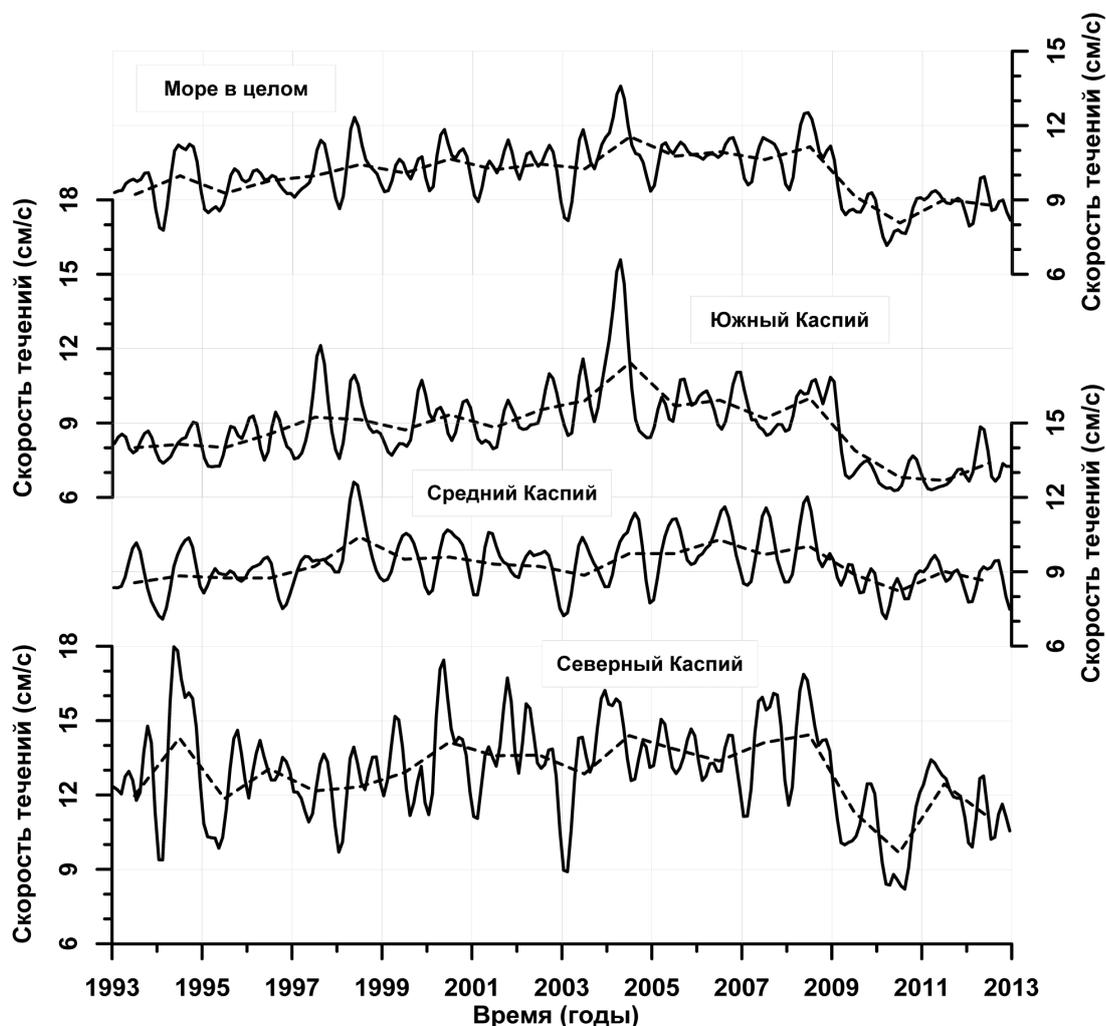


Рис. 6. Межгодовая изменчивость среднемесячных геострофических скоростей течений (см/с) в различных частях Каспия и моря в целом по данным альтиметрических измерений спутника Т/Р и J1/2 за сентябрь 1992 г. – декабрь 2012 г. Штриховыми линиями показаны среднегодовые величины

### Завихренность полей геострофических течений

Другой характеристикой поля течений является завихренность, количественной мерой которой служит ротор скорости  $\zeta = \frac{\partial V_g}{\partial x} - \frac{\partial U_g}{\partial y}$ . Положительная величина  $\zeta$  характеризует преобладание циклонической циркуляции, отрицательная – антициклонической.

Анализ сезонной изменчивости поля завихренности показывает, что в Северном и Среднем Каспии, как и в море в целом, преобладает циклоническая циркуляция, тогда как в южной части моря – антициклоническая циркуляция. Сезонная изменчивость вихревых режимов Северного и Среднего Каспия находятся в противофазе. Максимальная циклоническая завихренность в северной части моря, наблюдаемая летом в июле, соответствует минимуму завихренности в средней части моря. В Южном Каспии преобладает антициклоническая завихренность на протяжении всего года. Минимум ее наступает летом, а максимум – зимой.

Анализ межгодовой изменчивости завихренности поля геострофических течений показывает, что в различных частях Каспия и моря в целом она не имеют ярко выраженный сезонный характер, при этом наблюдаются и значительные межгодовые различия (рис. 7). Между Северным и Средним Каспием, как и в сезонном ходе, наблюдается противофаза в изменении завихренности.

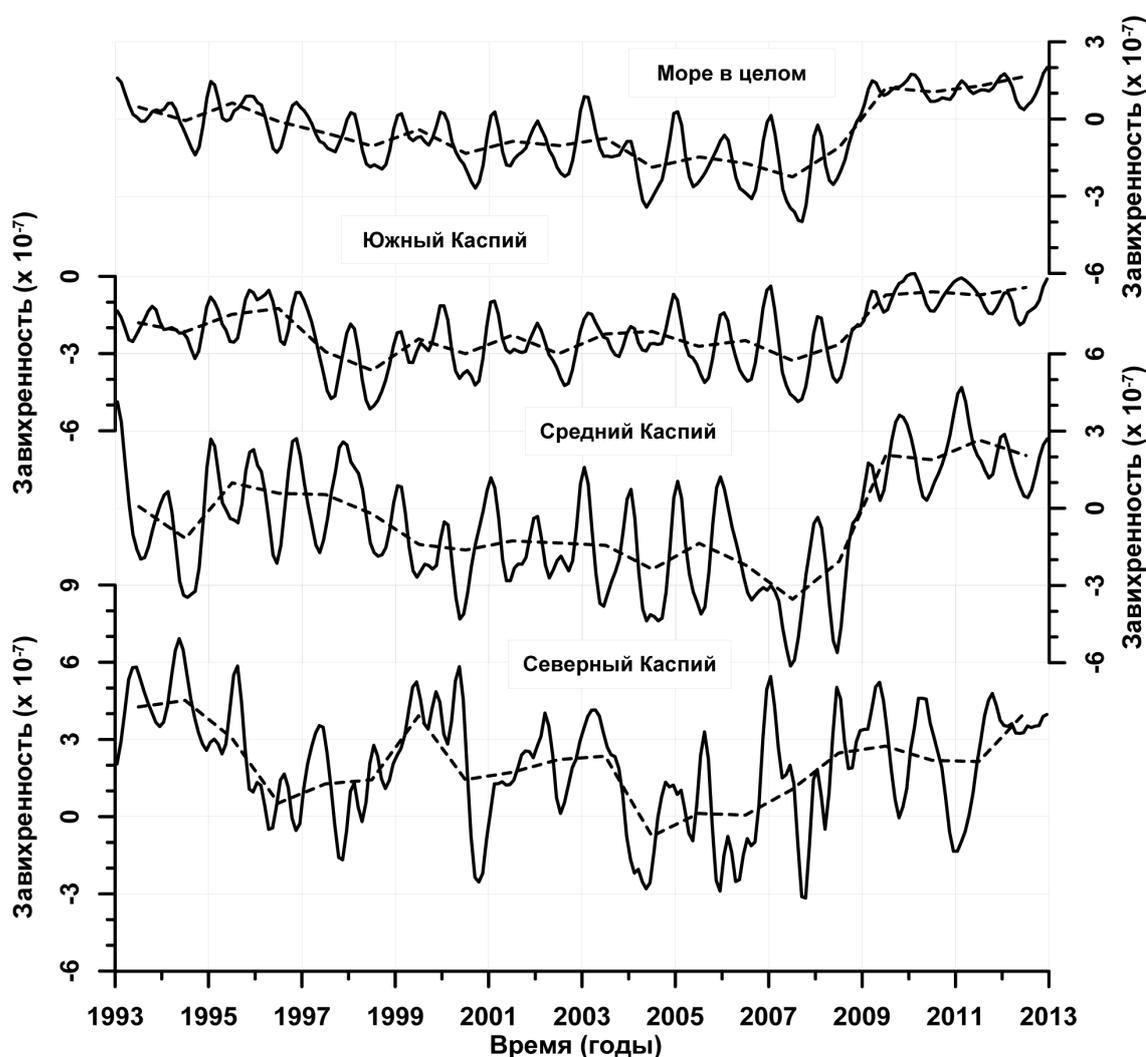
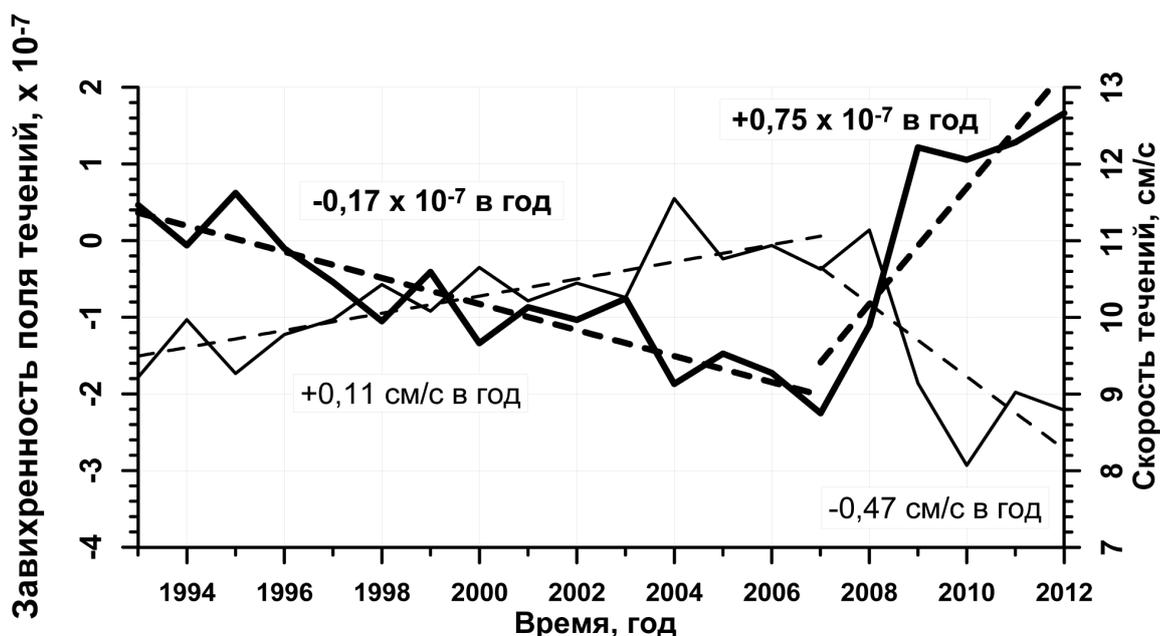


Рис. 7. Межгодовая изменчивость среднемесячной завихренности геострофических скоростей течений в различных частях Каспия и моря в целом по данным альтиметрических измерений спутника Т/Р и J1/2 за сентябрь 1992 г. – декабрь 2012 г. Штриховыми линиями показаны среднегодовые величины

В Северном Каспии в 1993–1995, 1999–2000, 2002–2003, 2007–2010 и 2012 гг. наблюдаются максимальные значения завихренности (более  $4 \times 10^{-7}$ ) относительно среднеклиматической величиной ( $2,02 \times 10^{-7}$ ). В Среднем Каспии в 1993 и 2009–2011 гг. наблюдались аномальные максимумы величины завихренности поля геострофических течений (более  $3 \times 10^{-7}$ ). Среднеклиматическая величина завихренности для этой части моря составила  $0,61 \times 10^{-7}$ . В Южном Каспии подобных локальных максимумов за период 1993–2012 гг. не наблюдалось. Среднеклиматическая величина завихренности полей течений для этой части моря составила  $-2,20 \times 10^{-7}$ , что говорит о преобладании антициклонической циркуляции. Для всего моря в целом величина завихренности составляет  $0,51 \times 10^{-7}$ . На *рис. 7* хорошо видно, что после 2008 г. величина завихренности почти во всех частях моря за исключением северной части увеличилась в пределах от  $1,5$ – $3 \times 10^{-7}$ . Согласно анализу временного хода среднемесячных скоростей течений (*рис. 6*), в это время наблюдалось падение во всех частях моря. Это еще раз подтверждает изменения режима циркуляции атмосферы в данном регионе.

Совместный анализ изменчивости среднегодовых величин скоростей течений и завихренности поля течений, рассчитанных по данным альтиметрических измерений (*рис. 8*) показывает, что средние скорости течений обратно зависимы от завихренности поля скоростей течений. Начиная с 1993 по 2007 гг. завихренность поля течений падала со скоростью  $-0,17 \pm 0,02 \times 10^{-7}$  в год, а модуль скорости рос  $+0,11 \pm 0,06$  см/с в год. После 2008 г. ситуация перевернулась на противоположную. Завихренность поля течений росла со скоростью  $+0,75 \pm 0,12 \times 10^{-7}$  в год, а модуль скорости падал  $-0,47 \pm 0,19$  см/с в год.



*Рис. 8. Межгодовая изменчивость среднегодовых величин завихренности (толстая линия) и модуля (тонкая линия) геострофических скоростей течений по данным альтиметрических измерений спутников Т/Р и J1/2 с 1993 по 2012 гг. Штриховые линии показывают тренд изменчивости*

## Заключение

Данные спутниковой альтиметрии позволяют с достаточной точностью на регулярной основе проводить численный анализ изменчивости динамики Каспийского моря. В будущем ассимиляция данных об аномалиях уровня и других данных ДЗЗ в численных термогидродинамических моделях позволят как повысить точность численных термогидродинамических моделей, так и описывать весь спектр циркуляции вод в Каспийском море.

Область применения полученных результатов позволит улучшить проектирование, строительство, эксплуатацию гидротехнических объектов в прибрежно-шельфовых зонах моря, прогноз эволюции экосистемы, рыболовство, оценку регионального изменения климата, информационное обеспечение экологической безопасности хозяйственной деятельности на Каспийском море.

Работа выполнена при частичной поддержке Российского научного фонда (проект № 14-17-00555), в рамках которого разработан алгоритм обработки данных спутниковой альтиметрии для исследования динамики Каспийского моря.

## Литература

1. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Т. VI. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия. СПб: Гидрометеоздат, 1992. 359 с.
2. Гилл А. Динамика атмосферы и океана. // Пер. с англ. М.: Мир, 1986. Т. 1. 396 с., Т. 2. 415 с.
3. Зонн И.С., Жильцов С.С. Новый Каспий: география, экономика, политика. М.: АСТ Восток–Запад, 2008. 542 с.
4. Зонн И.С., Костяной А.Г., Косарев А.Н., Жильцов С.С. Каспийское море. Энциклопедия. М.: Восточная книга, 2013. 560 с.
5. Ибраев Р.А. Математическое моделирование термогидродинамических процессов в Каспийском море. М.: ГЕОС, 2008. 128 с.
6. Каспийское море. Гидрология и гидрохимия. М.: Наука, 1986. 261 с.
7. Каспийское море. Структура и динамика вод. М.: Наука, 1990. 164 с.
8. Кныш В.В., Ибраев Р.А., Коротаев Г.К., Инюшина Н.В. Сезонная изменчивость климатических течений Каспийского моря, восстановленная ассимиляцией климатической температуры и солёности в модели циркуляции вод // Изв. РАН. ФАО. 2008. Т. 44. № 2. С. 251–265.
9. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. М.: ИКИ РАН, 2011. 480 с.
10. Лебедев С.А. Модель средней высоты морской поверхности Каспийского моря // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 3. С. 224–234.
11. Лебедев С.А. Спутниковая альтиметрия в науках о Земле // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2013. Т. 10. № 3. С. 33–49.
12. Лебедев С.А., Костяной А.Г. Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. М.: Изд. центр «МОРЕ» Международного института океана, 2005. 366 с.
13. Линейкин П.С., Фельзенбаум А.И. Теория и расчет ветровых течений Северного Каспия // Тр. ГОИН. 1955. № 20. С. 454–471.
14. Педлоски Дж. Геофизическая гидродинамика. // Пер. с англ. М.: Мир. 1984. 811 с.
15. Попов С.К. Моделирование климатической термохалинной циркуляции в Каспийском море // Метеорология и гидрология. 2004. № 5. С. 76–84.
16. Саркисян А.С., Заритов Б.Р., Косарев А.Н., Ржеплинский Д.Г. Диагностические расчеты течений в Каспийском море // Изв. АН СССР. ФАО. 1976. Т. 2. № 10. С. 1106–1110.
17. Сирота А.М., Лебедев С.А., Тимохин Е.Н., Чернышков П.П. Использование спутниковой альтиметрии для диагноза промыслово-океанологических условий в Атлантическом и юговосточной части Тихого океанов. Калининград: АтлантНИРО, 2004. 68 с.
18. Тужилкин В.С., Косарев А.Н., Трухчев Д.И., Иванова Д.П. Сезонные особенности общей циркуляции вод глубоководной части Каспийского моря // Метеорология и гидрология. 1997. № 1. С. 91–99.
19. Benada J.R. PODAAC Merged GDR (TOPEX/Poseidon) Generation B User's Handbook. JPL D-11007. Version 2.0. Pasadena: JPL, 1997. 131 p.

20. Dumont J.P., Rosmorduc V., Picot N., Desai S., Bonekamp H., Figa J., Lillibridge J., Scharroo R. OSTM/ Jason-2 Products Handbook. CNES: SALP-MU-M-OP-15815-CN. EUMETSAT: EUM/OPS-JAS/ MAN/08/0041. JPL: OSTM-29-1237. NOAA/NESDIS: Polar Series/OSTM J400. Issue 1. Rev. 8. CNES, EUMETSAT, JPL, 2011. 72 p.
21. Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Sheberstov S.V. Case Studies of Optical Remote Sensing in the Barents Sea, Black Sea, and Caspian Sea // Remote Sensing of the European Seas. Berlin, Heidelberg, New York: Springer-Verlag, 2008. P. 53–66. doi: 10.1007/978-1-4020-6772-3\_4.
22. Kouraev A.V., Cretaux J.-F., Lebedev S.A. et al. Satellite Altimetry Applications in the Caspian Sea // Coastal Altimetry. Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2011. P. 331–366. doi: 10.1007/978-3-642-12796-0\_13.
23. Lebedev S.A. Mean Sea Surface Model of the Caspian Sea Based on TOPEX/Poseidon and Jason-1 Satellite Altimetry Data // Geodesy for Planet Earth. IAG Geodesy Symposia V. 136. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2012. P. 833–841. doi: 10.1007/978-3-642-20338-1\_105.
24. Picot N., Case K., Desai S., Vincent P. AVISO and PODAAC User Handbook. IGDR and GDR Jason Products. SMM-MU-M5-OP-13184-CN (AVISO). JPL D-21352 (PODAAC). Edition 4.1. AVISO, PODAAC, 2008. 130 p.
25. Tapley B.D., Kim M.C. Applications to Geodesy // Satellite Altimetry and Earth Sciences. A Handbook of Techniques and Applications. San Diego: Academic Press, 2001. P. 371–406.

## Dynamics of the Caspian Sea based on satellite altimetry data

S.A. Lebedev <sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Geophysical Center RAS, Moscow 119296, Russia  
E-mail: lebedev@wdcb.ru

<sup>2</sup> Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia  
E-mail: sergey\_a\_lebedev@mail.ru

The article is devoted to the study of dynamics variability of the Caspian Sea based on satellite altimetry data. The technique of calculating the synoptic dynamic topography (DT) as a superposition of the mean sea climate DT calculated by thermohydrodynamic models of Hydrometeorological Center RF and field of sea level anomalies calculated by satellite altimetry data is considered. An analysis of geostrophic currents vorticity confirmed the predominance of cyclonic circulation in the Northern and Middle Caspian and anticyclonic circulation in the Southern Caspian. After 2008, the vorticity in all parts of the sea increased, indicating a regime change in atmospheric circulation over the water area of the Caspian Sea. Analysis of variation of annual average current velocity and vorticity shows that the average current velocity is inversely proportional to the vorticity. From 1993 to 2007, vorticity decreased at a rate of  $-0,17 \pm 0,02 \times 10^{-7}$  per year, and average velocity increased at a rate of  $+0,11 \pm 0,06$  cm/year. After 2008, the situation changed to the opposite. The vorticity increased at a rate  $+0,75 \pm 0,12 \times 10^{-7}$  per year, average velocity decreased at a rate of  $-0,47 \pm 0,19$  cm/year.

**Keywords:** the Caspian Sea, water dynamics, remote sensing, satellite altimetry, vorticity, regime of atmospheric circulation

### References

1. *Gidrometeorologiya i gidrokimiya morei SSSR. V. VI. Kaspiiskoe more. Vyp. 1. Gidrometeorologicheskie usloviya* (Hydrometeorology and hydrochemistry of USSR seas. Vol. VI. Caspian Sea. No 1. Hydrometeorological conditions), Saint-Petersburg: Gidrometeoizdat, 1992, 359 p.
2. Gill A. *Dinamika atmosfery i okeana* (Atmosphere-ocean dynamics), Moscow: Mir, 1986, Vol. 1, 396 p., Vol. 2, 415 p.
3. Zonn I.S., Zhil'tsov S.S. *Novyi Kaspii: geografiya, ekonomika, politika* (New Caspian: geography, economics, politics.), Moscow: AST Vostok-Zapad, 2008, 542 p.
4. Zonn I.S., Kostyanoy A.G., Kosarev A.N., Zhil'tsov S.S. *Kaspiiskoe more. Entsiklopediya* (Caspian Sea. Encyclopedia), Moscow: Vostochnaya kniga, 2013, 560 p.
5. Ibraev R.A. *Matematicheskoe modelirovanie termogidrodinamicheskikh protsessov v Kaspiiskom more* (Mathematical simulation thermo-hydrodynamic processes in the Caspian Sea), Moscow: GEOS, 2008, 128 p.
6. *Kaspiiskoe more. Gidrologiya i gidrokimiya* (Caspian Sea. Hydrology and hydrochemistry), Moscow: Nauka, 1986, 261 p.
7. *Kaspiiskoe more. Struktura i dinamika vod* (Caspian Sea. Structure and dynamics of water), Moscow: Nauka, 1990, 164 p.
8. Knysh V.V., Ibraev R.A., Korotaev G.K., Inyushina N.V. Seasonal variability of climatic currents in the Caspian Sea reconstructed by assimilation of climatic temperature and salinity into the model of water circulation, *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 2008, Vol. 44, No. 2, pp. 236–249.

9. Lavrova O.Yu., Kostyanoy A.G., Lebedev S.A., Mityagina M.I., Ginzburg A.I., Sheremet N.A. *Kompleksnyi sputnikovyi monitoring morei Rossii* (Complex Satellite Monitoring of the Russian Seas), Moscow: IKI RAS, 2011, 480 p.
10. Lebedev S.A. Model' srednei vysoty morskoi poverkhnosti Kaspiiskogo morya (Mean sea surface height model of the Caspian Sea), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 3, pp. 224–234.
11. Lebedev S.A. Sputnikovaya al'timetriya v nauках o Zemle (Satellite altimetry in the Earth Sciences), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2013, Vol. 10, No 3, pp. 33–49.
12. Lebedev S.A., Kostyanoy A.G. *Sputnikovaya al'timetriya Kaspiiskogo moray* (Satellite altimetry of the Caspian Sea), Moscow: Izd. tsentr "MORE" Mezhdunarodnogo instituta okeana, 2005, 366 p.
13. Lineikin P.S., Fel'zenbaum A.I. Teoriya i raschet vetrovykh techenii Severnogo Kaspiya (Theory and calculation of wind currents of the North Caspian ), *Tr. GOIN*, 1955, No. 20, pp. 454–471.
14. Pedloski Dzh. *Geofizicheskaya gidrodinamika* (Geophysical Fluid Dynamics), Moscow: Mir. 1984, 811 p.
15. Popov S.K. Modelirovanie klimaticheskoi termokhalinnoi tsirkulyatsii v Kaspiiskom more (Simulation of the climate thermohaline circulation in the Caspian Sea), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2004, No. 5, pp. 76–84.
16. Sarkisyan A.S., Zaripov B.R., Kosarev A.N., Rzhaplinskii D.G. Diagnosticheskie raschetny techenii v Kaspiiskom more (Diagnostic calculations of currents in the Caspian Sea), *Izv. AN SSSR. FAO*, 1976, Vol. 2, No. 10, pp. 1106–1110.
17. Sirota A.M., Lebedev S.A., Timokhin E.N., Chernyshkov P.P. *Ispol'zovanie sputnikovoi al'timetrii dlya diagnoza promyslovo-okeanologicheskikh uslovii v Atlanticheskoi i yugovostochnoi chasti Tikhogo okeanov* (Using satellite altimetry for the diagnosis of field-oceanographic conditions in the Atlantic and the southeastern part of the Pacific Oceans), Kaliningrad: AtlantNIRO, 2004, 68 p.
18. Tuzhilkin B.C., Kosarev A.N., Trukhchev D.I., Ivanova D.P. Sezonnnye osobennosti obshchei tsirkulyatsii vod glubokovodnoi chasti Kaspiiskogo morya (Seasonal features of the general circulation of the deep part of the Caspian Sea), *Meteorologiya i gidrologiya*, 1997, No. 1, pp. 91–99.
19. Benada J.R. *PODAAC Merged GDR (TOPEX/Poseidon) Generation B User's Handbook*, JPL D–11007, Version 2.0. Pasadena: JPL, 1997, 131 p.
20. Dumont J.P., Rosmorduc V., Picot N., Desai S., Bonekamp H., Figa J., Lillibridge J., Scharroo R. *OSTM/Jason–2 Products Handbook*, CNES: SALP-MU-M-OP-15815-CN, EUMETSAT: EUM/OPS-JAS/MAN/08/0041, JPL: OSTM-29-1237, NOAA/NESDIS: Polar Series/OSTM J400, Issue 1, Rev. 8, CNES, EUMETSAT, JPL, 2011, 72 p.
21. Kopelevich O.V., Burenkov V.I., Sheberstov S.V. *Case Studies of Optical Remote Sensing in the Barents Sea, Black Sea, and Caspian Sea*, Remote Sensing of the European Seas, Berlin, Heidelberg, New York: Springer–Verlag, 2008, pp. 53–66, doi: 10.1007/978-1-4020-6772-3\_4.
22. Kouraev A.V., Cretaux J.-F., Lebedev S.A. et al. *Satellite Altimetry Applications in the Caspian Sea*, Coastal Altimetry, Berlin, Heidelberg: Springer Verlag, 2011, P. 331–366, doi: 10.1007/978-3-642-12796-0\_13.
23. Lebedev S.A. *Mean Sea Surface Model of the Caspian Sea Based on TOPEX/Poseidon and Jason–1 Satellite Altimetry Data*, Geodesy for Planet Earth, IAG Geodesy Symposia V. 136, Berlin, Heidelberg: Springer–Verlag, 2012, P. 833–841, doi: 10.1007/978-3-642-20338-1\_105.
24. Picot N., Case K., Desai S., Vincent P. *AVISO and PODAAC User Handbook. IGDR and GDR Jason Products*, SMM-MU-M5-OP-13184-CN (AVISO), JPL D–21352 (PODAAC), Edition 4.1, AVISO, PODAAC, 2008, 130 p.
25. Tapley B.D., Kim M.C. *Applications to Geodesy*, Satellite Altimetry and Earth Sciences. A Handbook of Techniques and Applications, San Diego: Academic Press, 2001, pp. 371–406.