

Модель средней высоты морской поверхности Каспийского моря

С.А. Лебедев^{1,2}

¹ *ФГБУН Геофизический центр Российской академии наук,
117296, Москва, Молодежная, 3,
e-mail: lebedev@wdcb.ru*

² *ФГБУН Институт космических исследований Российской академии наук,
117997, Москва, Профсоюзная, 84/32,
e-mail: sergey_a_lebedev@mail.ru*

Модель средней высоты морской поверхности (СВМП) Мирового океана, включая акваторию Каспийского моря, вычисляется осреднением по времени данных альтиметрических измерений высот морской поверхности (ВМП) с учетом поправки на высоту приливов и поправки обратного барометра. Для Каспийского моря такая методика расчета СВМП представляет определенную трудность. За период регулярных измерений ВМП с борта ИСЗ с 1986 по 1996 гг. уровень Каспия вырос с $-28,0$ до $-26,5$ м в Балтийской системе (БС), а к настоящему времени упал до $-27,6$ м. Исходя из определения СВМП, как поверхности наиболее приближенной к эквипотенциальной поверхности моря, в данной статье предлагается вычислять региональную модель СВМП Каспийского моря как функцию, зависящую не только от широты и долготы, но и от времени с учетом сезонной и синоптической изменчивости ВМП. Данные альтиметрических измерений ВМП спутников TOPEX/Poseidon (Т/Р) и Jason-1/2 (J1/2) обрабатывались с учетом всех необходимых поправок с устранением сезонной изменчивости уровня для каждого трека. Такой метод расчета СВМП требует постоянного обновления по мере поступления новых данных спутниковой альтиметрии минимум каждый год. Для каждого календарного года ВМП интерполировалась на регулярную сетку методом разложения на радиальные базисные функции с учетом климатической динамической топографии Каспия. Построенная в 2011 году по такой методике СВМП Каспийского моря (названная как MSS GCRAS11 — Mean Sea Surface of Geophysical Center RAS 2011) впервые позволила проанализировать не только межгодовую изменчивость уровня Каспия, но и пространственную неоднородность скорости его подъема или падения и ее связь с особенностями гравитационного поля.

Ключевые слова: спутниковая альтиметрия, Каспийское море, TOPEX/Poseidon, Jason-1/2, модель средней высоты морской поверхности, MSS GCRAS11

Введение

Понятия геоида и средней высоты морской поверхности (СВМП) имеют ключевое значение при правильной интерпретации данных спутниковой альтиметрии как в океанологических, так и в геодезических задачах.

Модели средней высоты морской поверхности Каспийского моря

Сегодня существует множество глобальных моделей СВМП Мирового океана, в которые включенная акватория Каспийского моря (Лебедев, Костяной, 2005). Они отличаются друг от друга как данными, используемыми при расчетах (а следовательно, и временным интервалом осреднения) (рис. 1), так и пространственным разрешением (Lebedev, Kostianoy, 2008; Lebedev, 2012).

Модель СВМП Мирового океана, включая акваторию Каспийского моря, вычисляется осреднением по времени данных альтиметрических измерений высот морской поверхности (ВМП) с учетом поправки на высоту приливов и поправки обратного барометра. Для Каспийского моря такая методика расчета СВМП представляет определенную трудность по следующим причинам.

1. Основной особенностью Каспийского моря является тот факт, что его уровень ниже уровня Мирового океана примерно на 27 м в Балтийской системе (БС) (Гидрометеорология..., 1992), а это значит, что эквипотенциальная поверхность, соответствующая невозмущенной поверхности моря, не совпадает с геоидом (Лебедев, Костяной, 2005).

2. За период регулярных измерений ВМП с борта ИСЗ с 1986 по 1996 гг. уровень Каспия вырос с -28 до $-26,5$ м БС (Лебедев, Костяной, 2005; Костяной и др., 2008; Lebedev, Kostianoy, 2008), а к настоящему времени упал до $-27,6$ м БС (Абузьяров, Нестеров, 2011; Костяной и др., 2011; Лаврова и др., 2011; Kouraev и др., 2011).
3. Сильные штормовые нагоны величиной $3...4$ м характерны для мелководного Северного Каспия (Kosarev, 2005; Kouraev и др. 2011).
4. В умеренные зимы формирование льда на Северном Каспии начинается в середине ноября, а таяние его начинается в марте. В среднем, продолжительность стояния ледникового покрова — $120...140$ дней в восточной части и $80...90$ дней или меньше в западной части Северного Каспийского. В суровые зимы формирование льда происходит почти вдоль всего восточного и западного побережья Среднего Каспия (Гидрометеорология..., 1992; Kosarev, 2005).
5. Каспийское море имеет существенные особенности водного баланса. Основными его составляющими являются сток реки Волга (более 80% от суммарного стока), испарение и сток в залив Кара-Богаз-Гол, которые имеют сильную межгодовую изменчивость. Так, с 1985 г., когда начали проводиться активные спутниковые измерения ВМП, по настоящее время расход воды в створе Волгоградской электростанции колебалась от $5609,25$ м³/с (2006) до $1\ 136\ 983$ м³/с (1996) (Kosarev, 2005; Лебедев, Костяной, 2005). В июне 1992 г. дамба между Каспийским морем и Заливом Кара-Богаз-Гола была разрушена, и естественный сток морской воды в залив возобновлен. До середины 1996 г. залив быстро заполнялся каспийской водой (Kosarev, Kostianoy, 2005; Лебедев, Костяной, 2005).

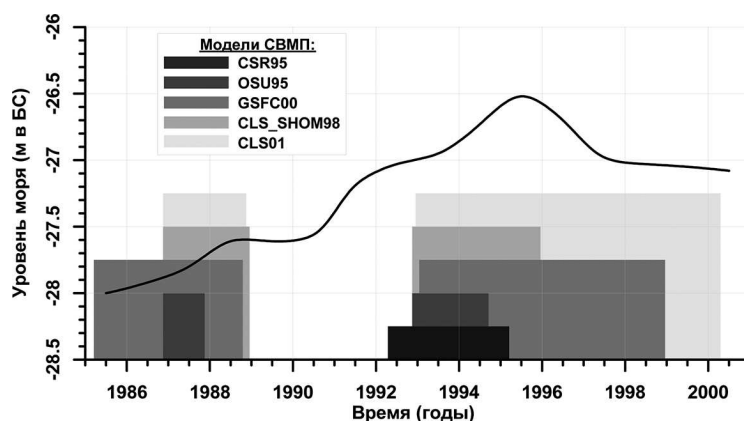


Рис. 1. Сравнение интервалов осреднения данных спутниковой альтиметрии, используемых при построении основных моделей СВМП, с межгодовой изменчивостью уровня Каспийского моря

Поэтому, исходя из определения СВМП, как поверхности наиболее приближенной к эквипотенциальной поверхности моря, в данной статье предлагается вычислять региональную модель СВМП Каспийского моря как функцию, зависящую не только от широты и долготы, но и от времени с учетом сезонной и синоптической изменчивости ВМП.

Используемые данные и методика их обработки

Для построения региональной модели СВМП Каспийского моря использовались данные спутников TOPEX/Poseidon (T/P) и Jason-1/2 (J1/2). Этот выбор обусловлен следующими причинами:

1. Точность измерения высоты спутника над морской поверхностью для этой программы составляет $1,7$ см (Fu, Pihos, 1994), а расчет самой высоты морской поверхности

относительно отсчетного эллипсоида для открытого океана — 4,2 см (Chelton et al., 2001), что является наилучшей характеристикой по сравнению с другими программами альтиметрических измерений.

2. Внутри каждого 10-суточного цикла на акватории Каспийского моря расположено четыре нисходящих (четные номера) и четыре восходящих (нечетные номера) трека (рис. 2).
3. Временной масштаб повторения измерений вдоль трека — 9,916 сут (т. е. примерно три раза в месяц) — наиболее приемлем для исследования синоптической и сезонной изменчивости уровня Каспийского моря.
4. Массив данных Т/Р (Venada, 1997) представляет собой непрерывный и наиболее длинный по времени ряд измерений (с сентября 1992 г. по август 2002 г.) с возможностью его продления данными спутника J1 (Picot и др., 2006) (с января 2002 г. по февраль 2009 г.) и J2 (Dumont и др., 2009) (с августа 2008 г. по настоящее время). 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.

Для расчетов СВМП брался временной интервал с 1 января 1993 г. по 31 декабря 2011 г. Обработка и интерпретация данных спутниковой альтиметрии проводились с использованием программного обеспечения Интегрированной базы данных спутниковой альтиметрии (ИБДСА), разработанной в ФГБУН Геофизическом центре РАН (Лебедев, 1996; Medvedev et al., 1997; Лебедев, Медведев, 2000; Лебедев, Костяной, 2005).

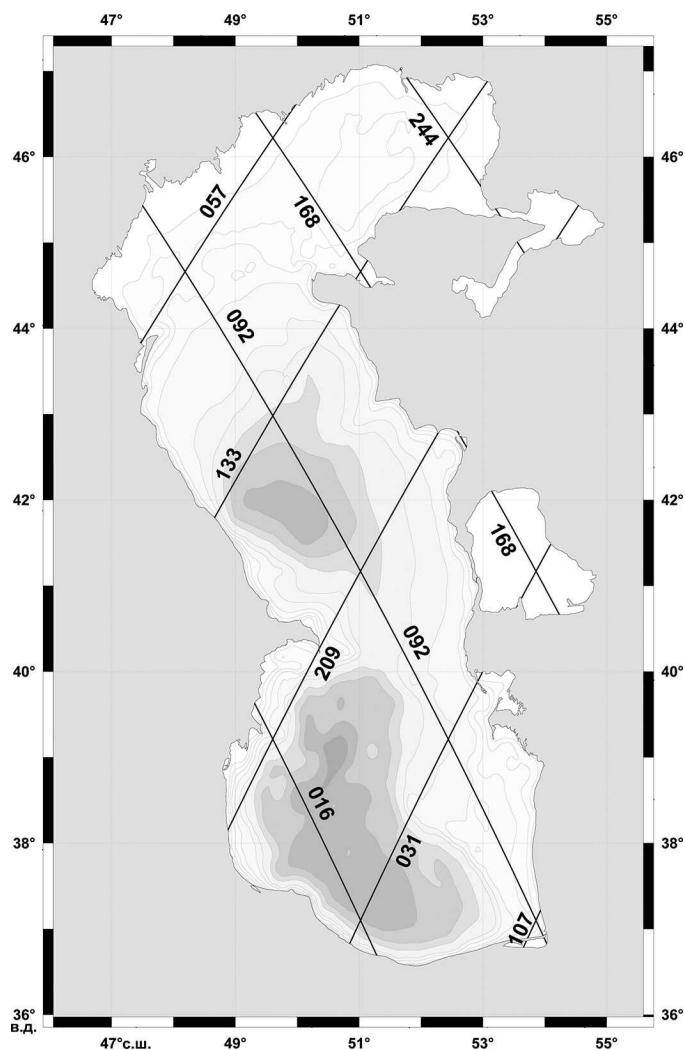


Рис. 2. Расположение треков спутников Т/Р и J1/2 на акватории Каспийского моря

Данные альтиметрических измерений ВМП спутников Т/Р и J1/2 обрабатывались с учетом всех необходимых поправок с устранением сезонной изменчивости уровня для каждого трека. «Сухая» тропосферная поправка рассчитывалась по данным близлежащих береговых метеостанций, так как ошибки расчетов данной поправки по модельным данным для акватории Каспийского моря составляет 2,25...3,86 см (Kourgaev и др., 2011; Lebedev, 2012).

Такой метод расчета СВМП требует постоянного обновления по мере поступления новых данных спутниковой альтиметрии. Для каждого календарного года ВМП интерполировались на регулярную сетку методом разложения на радиальные базисные функции с учетом климатической динамической топографии Каспия (Попов, 2004). Построенная по такой методике СВМП Каспийского моря (названная как MSS GCRAS11 — Mean Sea Surface of Geophysical Center RAS 2011) впервые позволила проанализировать не только межгодовую изменчивость уровня Каспия, но и пространственную неоднородность скорости его подъема или падения и ее связь с особенностями гравитационного поля.

Особенности гравитационного поля Каспия

Особенности гравитационного поля на акватории Каспийского моря (Лебедев, Костяной, 2005) можно оценить по модели гравитационного поля EGM96 (Lemoine и др., 1998). Для Северного Каспия высота геоида понижается от -4 до -16 м вдоль дуги от Кизлярского залива к устью реки Урал (рис. 3а). В северной части Среднего Каспия высота геоида изменяется от -4 до -12 м по направлению от Махачкалы до Форт-Шевченко, а в южной части — от -10 до -18 м вдоль оси моря по направлению к Апшеронскому порогу и достигает своего минимума фактически на границе Среднего и Южного Каспия. Минимум высоты геоида (около -21 м) соответствует понижению рельефа юго-восточнее Апшеронского полуострова. Далее высота геоида повышается по направлению к западному и южному берегу моря, повторяя собой изменения рельефа дна. У восточного берега Южного Каспия в Туркменском заливе находится второй локальный минимум (около -19 м) высоты геоида.

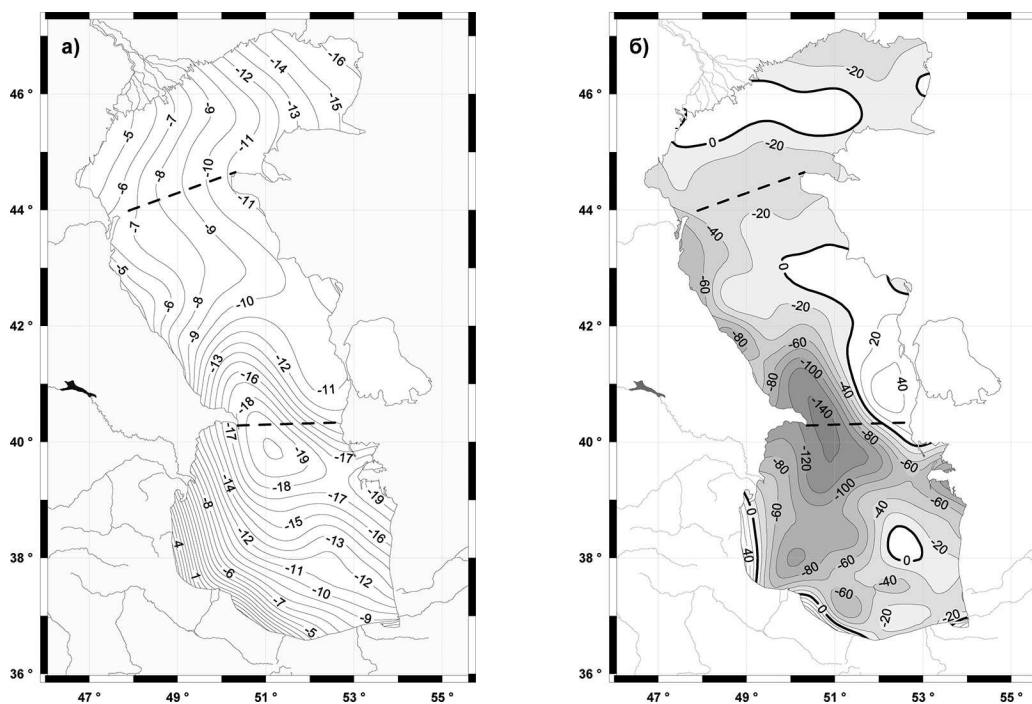


Рис. 3. Карта высот геоида (в м) (а) и аномалий силы тяжести (в мГал) (б) Каспийского моря, рассчитанные по модели EGM96 с разложением до 360° . Оттенки серого соответствуют отрицательным значениям АСТ. Штриховые линии показывают границы между Северным, Средним и Южным Каспием

Согласно модели EGM96 минимум аномалий силы тяжести (АСТ) на акватории Каспийского моря -148 мГал (рис. 3б) наблюдается восточнее Апшеронского полуострова вдоль Апшеронского порога. Другой локальный минимум АСТ -105 мГал расположен в западной части Ленкоранской впадины. Максимальные величины АСТ 53 мГал наблюдаются западнее канала, соединяющего море и залив Кара-Богаз-Гол. В Северном Каспии АСТ изменяются слабо от -35 до 15 мГал. Минимальные значения наблюдаются в Кизлярском заливе и районе дельте реки Урал, а максимальные величины — в районе дельты реки Волги и северо-восточнее острова Кулалы и юго-западнее Уральской бороздины. В Среднем Каспии АСТ изменяются от -60 до -80 мГал вдоль западного побережья по направлению к Апшеронскому полуострову. Вдоль восточного побережья от полуострова Мангышлак АСТ увеличиваются в направлении от Форт-Шевченко до залива Кара-Богаз-Гол от -20 до 0 мГал. Сильная изменчивость АСТ от -140 до 18 мГал наблюдается в районе Ленкоранской впадины, и имеют хорошую корреляцию с глубиной. Максимальный градиент АСТ (более тогда 2 мГал/км) локализован в районе середины Апшеронского полуострова вдоль оси моря и около юго-западного побережья Южного Каспия.

Результаты и их обсуждение

Для иллюстрации возможности использования модели СВМП Каспия GCRAS11 проводился анализ временной изменчивости ВМП, АСТ и градиента АСТ вдоль нисходящего 092-го трека, который пересекает море почти по его оси (см. рис. 2). Временная изменчивость ВМП вдоль данного трека после фильтрации синоптической и сезонной изменчивости представлена на рис. 4а.

В период максимального подъема уровня Каспийского моря летом 1995 г. (рис. 5) неоднородность скорости изменения ВМП хорошо просматривается в пространственном положении изолинии $-35,5$ м, наблюдаемом с января 1993 г. до декабря 1997 г. на широтах $43...44^\circ$ с.ш. (рис. 4а). Эта область соответствует величинам градиентам АСТ $0...0,3$ мГал/км и значениям АСТ $-40...-10$ мГал (рис. 4в).

В поле временной изменчивости ВМП изолиния -46 м, соответствующая минимальному значению, располагается на широтах $39,5...40^\circ$ с.ш. (рис. 4а). Она исчезает на временном интервале с 1994 по 1997 гг., когда наблюдается окончание сильного подъема уровня Каспия до $-26,4$ м и начала его сильного падения. В 2005 г. также наблюдалась тенденция к исчезновению изолинии -46 м ВМП в период окончания слабого роста уровня моря до $-26,7$ м. Эта область соответствует максимальным градиентам АСТ $0,4$ мГал/км и значениям АСТ $-90...-40$ мГал (рис. 4в).

Скорость подъема или падения ВМП ведет себя по-другому. Область максимальных скоростей подъема ВМП (более 25 см/г) в период с 1993 по 1995 г. наблюдается на широтах $42...42,5^\circ$ с.ш. (рис. 4б), что соответствует максимальным градиентам АСТ $-0,4$ мГал/км и значениям АСТ $-40...-5$ мГал (рис. 4в). В этом районе наблюдаются локальные экстремумы скорости изменения ВМП. Анализ положения изолинии 0 см/г показывает, что приостановка падения уровня моря в 2002 г. до $-27,4$ м в отличие от достижения максимума уровня летом 1995 г., вдоль трека проходила не одинаково. Вначале уровень стабилизировался на границе между Средним и Южным Каспием ($40...41^\circ$ с.ш.) и окончание его стабилизации происходила на широтах $41,5...42^\circ$ с.ш. в среднем Каспии и $37...39,5^\circ$ с.ш. в Южном Каспии (рис. 4б).

С сентября 1992 г. по настоящее время изменчивость уровня Каспийского моря хорошо прослеживается по данным спутниковой альтиметрии (см. рис. 5). Результаты расчетов показали, что этот временной период можно разделить на пять интервалов. С зимы 1992/1993 гг. до лета 1995 г. наблюдался резкий рост уровня моря до отметки $-26,4$ м в БС со скоростью $19,93 \pm 2,14$ см/г. Затем до зимы 1997/1998 г. наблюдалось очередное резкое понижение до от-

метки $-27,1$ м в БС со скоростью $22,17 \pm 2,45$ см/г. Умеренное падение продолжилось до зимы 2001/2002 гг. до отметки $-27,4$ м со скоростью $5,89 \pm 1,09$ см/г. Последующий умеренный рост до отметки $-26,7$ м со скоростью $9,92 \pm 1,78$ см/г наблюдался до лета 2005 г. (Лебедев, Костяной, 2005). С лета 2005 г. по зиму 2009/2010 г. уровень моря умеренно падал до отметки $-27,3$ м со скоростью $7,96 \pm 1,23$ см/г (Лаврова и др., 2011). Это падение наблюдается и в настоящее время с более высокой скоростью $21,19 \pm 1,19$ см/г. К декабрю 2011 г. уровень Каспийского моря упал до $-27,6$ м.

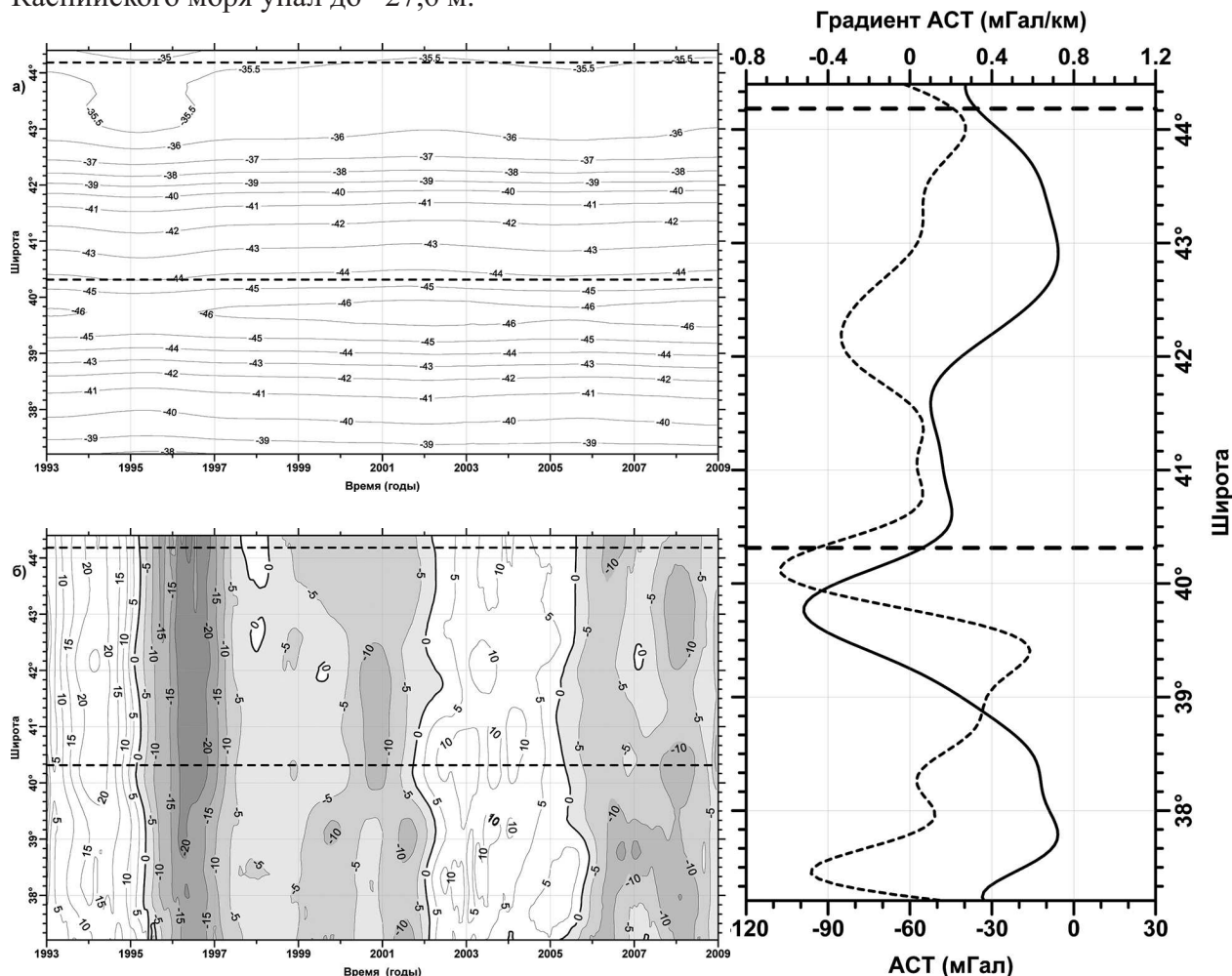


Рис. 4. Пространственно-временная изменчивость: а — ВМП без сезонной и синоптической изменчивости (в м); б — скорости подъема или падения ВМП (в см/г); в — пространственная изменчивость АСТ (в мГал) (сплошная линия) и ее градиента (в мГал/км) (штриховая линия) вдоль нисходящего 092-го трека спутников Т/Р и J1/2, рассчитанные по модели EGM96 с разложением до 360° . Оттенки серого соответствуют отрицательным скоростям изменения ВМП. Штриховые линии показывают границы между Северным, Средним и Южным Каспием

Сравнение расчетов по данным уровенных постов и спутниковой альтиметрии показало хорошее соответствие полученных результатов. Для временного интервала 1993–2009 гг. коэффициент корреляции составил от 0,74 до 0,98 (Лебедев, Костяной, 2005).

Анализ изменчивости СВМП для Каспийского моря показал, что уровень моря рос и падал не равномерно по акватории моря (рис. 6). В период с 1993 по 1995 г. максимальная скорость подъема уровня Каспийского моря более 20 см/год наблюдалась в районе Дербентской и Ленкоранской впадин (рис. 6а), а также в районе восточной части Апшеронского порога. Однако севернее него на свале глубин 200...300 м скорость роста не превышала 14...16 см/г. Аналогичная скорость подъема уровня Каспийского моря наблюдалась в районе пролива, соединяющего море с заливом Кара-Богаз-Гол. Столь малая скорость подъема уровня моря, судя по всему, объясняется тем, что после взрыва плотины, отделяющей залив

от моря в 1992 г., имел место процесс активного заполнения залива морской водой. Уровень залива в это время поднимался со скоростью $168,5 \pm 5,23$ см/г (Лебедев, Костяной, 2005; Lebedev, Kostianoy, 2008; Костяной и др., 2011; Kouzaev et al., 2011) В восточной части Северного Каспия восточнее Уральской бороздины скорость подъема уровня в среднем составила 6...14 см/г, а в западной части дельты Волги и у побережья Калмыкии и Дагестана — более 18 см/г. Вдоль побережья Ирана и южного побережья Азербайджана скорость падения не превысила 2...12 см/г.

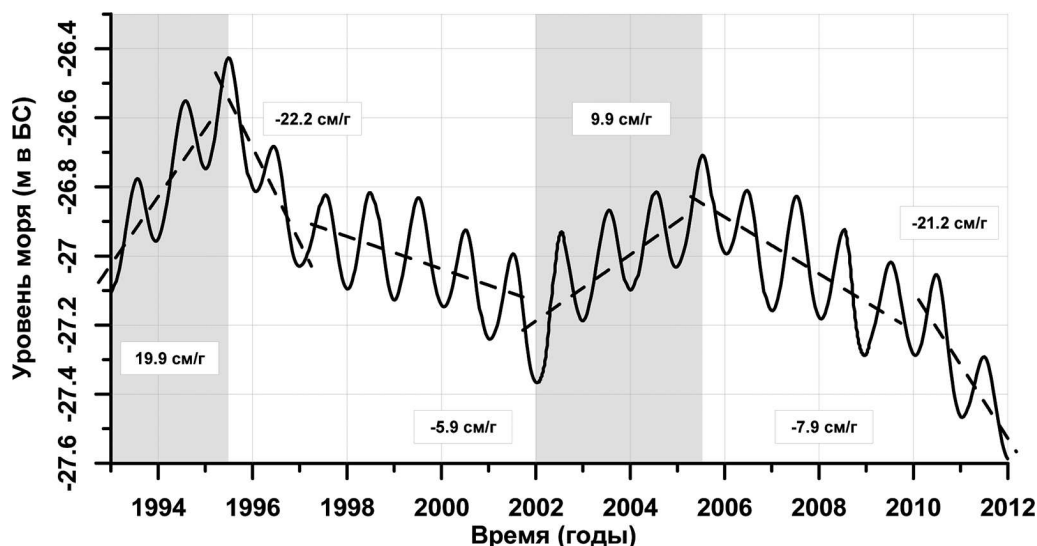


Рис. 5. Межгодовая и сезонная изменчивость уровня Каспийского моря по данным альтиметрических измерений спутников T/P и J1/2

В период резкого падения уровня Каспия (1995–1997) максимальная скорость падения более 22 см/г также наблюдалась в районе Дербентской и Ленкоранской впадин (рис. 6б), восточной части Апшеронского порога и вдоль восточного побережья, отделяющего море от залива Кара-Богаз-Гол. Аналогичные скорости падения уровня наблюдались в западной части Северного Каспия и в его восточной части в районе Уральской бороздины. Вдоль побережья Ирана и южной части побережья Азербайджана скорость падения не превысила 2...10 см/г. Невысокие скорости снижения уровня моря наблюдались и у восточного побережья Северного Каспия (4...10 см/г).

Для следующего временного интервала 1997–2001 гг., характеризующегося умеренным падением уровня Каспийского моря, пространственная неоднородность скорости падения уровня показана на рис. 6в. Скорость более 8 см/г наблюдается в северной части Апшеронского порога, а также вдоль всего побережья Апшеронского полуострова. В Южном Каспии восточнее Ленкоранской впадины на свале глубин 500...700 м наблюдается максимальная скорость падения уровня Каспийского моря (более 9 см/г). В восточной части Апшеронского порога скорость падения не превысила величину 4...5 см/г. Аналогичная скорость наблюдалась в Северном Каспии и вдоль южной части побережья Азербайджана. Минимального значения (менее 3 см/г) она достигла в Туркменском и Красноводском заливах.

Следующий период умеренного роста уровня Каспийского моря (2001–2005) (рис. 6з) характеризуется скоростью подъема уровня более 12 см/г в районе Ленкоранской впадины и в северо-восточной части Среднего Каспия севернее Апшеронского порога. Большие скорости роста (9...10 см/г) наблюдаются также в западной части Северного Каспия, прилегающей к дельте Волги, и в его восточной части. Вдоль побережья Азербайджана, Ирана и Туркменистана ее величина не превысила 7...8,5 см/г.

Наблюдающееся с 2005 г. умеренное падение уровня Каспия (рис. 6д) также имеет неравномерное распределение скорости падения уровня моря. Максимальных значений (более

9 см/г) она достигает в Южном Каспии (на свале глубин более 700 м, юго-восточнее Апшеронского порога и западнее центральной части побережья Туркменистана) и в Северном Каспии в районе западной части дельты Волги и севернее Мангышлакского залива. В центральной части моря скорость падений уровня лежит в интервале от 7 до 8,5 см/г. По сравнению с предыдущими периодами падения уровня (1995–2001 гг.) скорость падения уровня вдоль побережья Ирана максимальна и составляет величину 7...9 см/г.

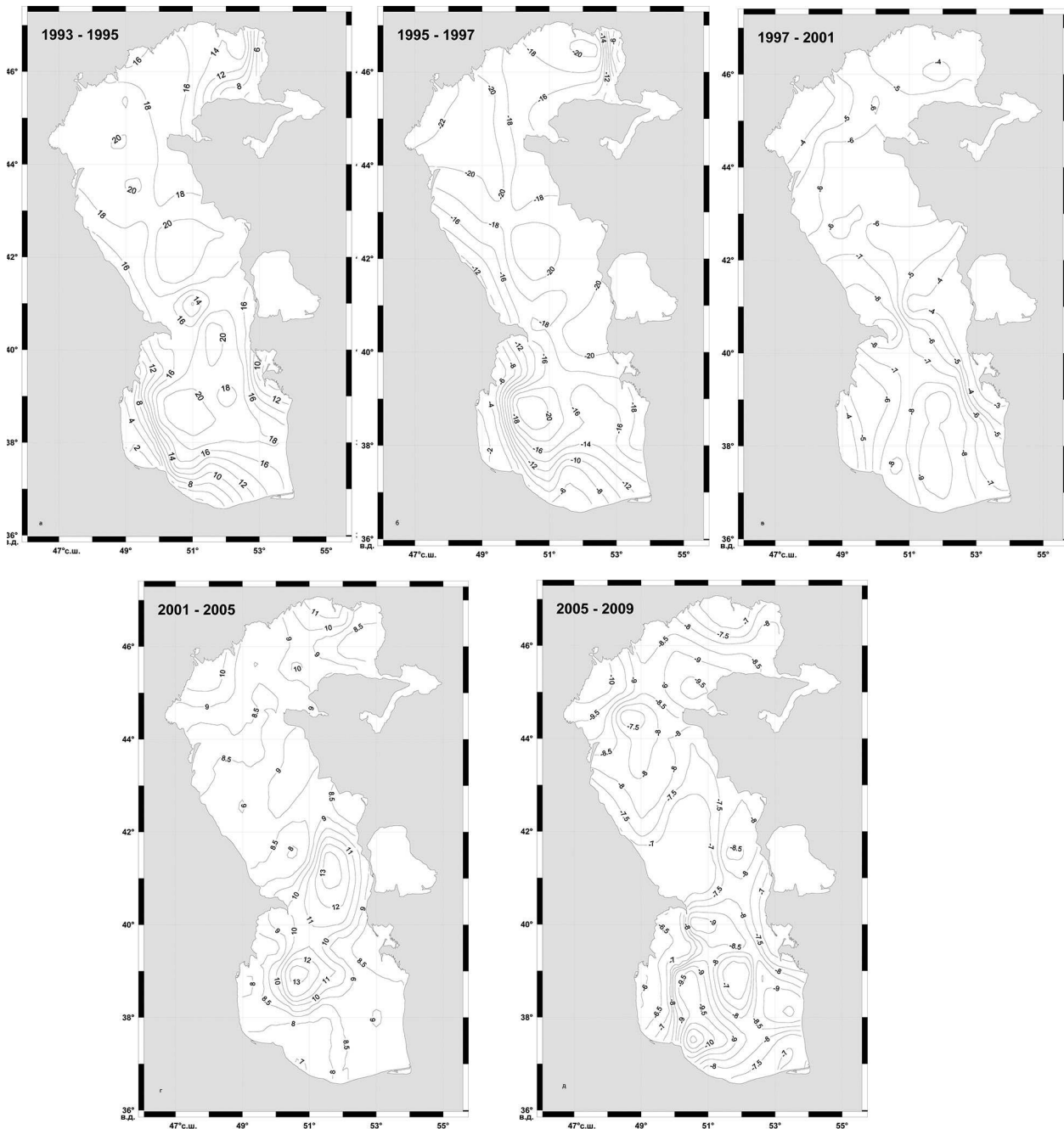


Рис. 6. Карта межгодовой изменчивости уровня Каспийского моря (в см/г) для пяти периодов времени: а — сильное повышение (1993–1995); б — сильное падение (1995–1997); в — медленное падение (1997–2002); г — медленное повышение (2002–2006); д — медленное падение (2006–2008). Штриховые линии показывают границы между Северным, Средним и Южным Каспием

Таким образом, можно выделить районы, в которых наблюдаются максимальные скорости падения или роста уровня. В первую очередь это западная часть дельты Волги, районы Апшеронского порога, Дербентской и Ленкоранской впадин и Уральской бороздины.

Заключение

Полученные результаты показали, что скорость изменения ВМП Каспийского моря (следовательно, и уровня) как по его акватории в целом так и вдоль нисходящего 092-го трека спутников Т/Р и J1/2 имеет существенную пространственную изменчивость. Поэтому метод осреднения скорости роста и/или падения уровня Каспийского моря по акватории или вдоль какого-либо трека альтиметрических измерений не применим. Необходимо районирование акватории моря по скоростям изменения уровня с целью улучшения понимания как особенностей гидрометеорологических условий различных частей акватории Каспия, так и создание методов физически обоснованных прогнозов его изменчивости в будущем.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 10-05-01123-а, 11-01-12046-офи-м-2011, 11-05-97037-р_поволжье_а, 11-07-12025-офи-м-2011) и Министерства образования и науки (Госконтракт № 11.519.11.1005).

Литература

1. *Абузяров З.К., Нестеров Е.С.* Некоторые особенности пространственно-временной изменчивости уровня Каспийского моря // Тр. Гидрометцентра России. 2011. Вып. 345. С. 4–22.
2. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Проект «Моря». Т. 6. Каспийское море. Вып. 1. Гидрометеорологические условия / Под ред. Ф.С. Терзиева, А.Н. Косарева, А.А. Керимова. СПб.: Гидрометеоиздат, 1992. 359 с.
3. *Костяной А.Г., Лебедев С.А., Зонн И.С., Лаврова О.Ю., Соловьев Д.М.* Спутниковый мониторинг Туркменистана. М.: Сигнал, 2011. 16 с.
4. *Костяной А.Г., Терзиев Ф.С., Гинзбург А.И., Заклинский Г.В., Филиппов Ю.Г., Лебедев С.А., Незлин Н.П., Шеремет Н.А.* Южные моря: Оценочный доклад об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Т. 2. Последствия изменения климата. Росгидромет, 2008. С. 149–167.
5. *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.
6. *Лебедев С.А.* Возможности автоматизированной реляционной геодисциплинарной оперативной системы АРГОС при работе со спутниковой информацией // Метеорология и гидрология. 1996. № 2. С. 110–115.
7. *Лебедев С.А., Костяной А.Г.* Спутниковая альтиметрия Каспийского моря. М.: Море, 2005. 366 с.
8. *Лебедев С.А., Костяной А.Г.* Спутниковая альтиметрия Каспийского моря // Вестн. Каспия. 2004. № 3. С. 82–101.
9. *Лебедев С.А., Медведев П.П.* Интегрированная база данных спутниковой альтиметрии // 6-я Международная научно-технич. конф. «Современные методы и средства океанологических исследований». 15–17 ноября 2000, Москва: Материалы конф. М.: ИО РАН. 2000. Ч. 2. С. 52–57.
10. *Попов С.К.* Моделирование климатической термохалинной циркуляции в Каспийском море // Метеорология и гидрология. 2004. № 5. С. 76–84.
11. *Benada R.J.* Merged GDR (TopeX/Poseidon). Generation B Users Handbook, Version 2.0, Physical Oceanography Distributed Active Archive Center (PODAAC), Jet Propulsion Laboratory, Pasadena, JPL D-11007, 1997. 131 p.
12. *Chelton D.B., Ries J.C., Haines B.J., Fu L.-L., Callahan P.S.* Satellite Altimetry // Satellite Altimetry and Earth Sciences: Handbook of Techniques and Applications / Eds. L.-L. Fu, A. Cazenave. Academic Press, 2001. P. 1–131.
13. *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. Iss. 1. Rev. 4. 2009. 67 p.
14. *Fu L.-L., Pihos G.* Determining the response of sea level to atmospheric pressure forcing using TOPEX/Poseidon data // J. Geophysical Research. 1994. V. 99. N. C12. P. 24-633–24-642.

15. *Kosarev A.N.* Physico-Geographical Conditions of the Caspian Sea // *The Caspian Sea Environment: The Handbook of Environmental Chemistry* / Eds. A.G. Kostianoy, A.N. Kosarev. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2005. P. 59–81. doi: 10.1007/698_5_002.
16. *Kosarev A.N., Kostianoy A.G.* Kara-Bogaz-Gol Bay // *The Caspian Sea Environment: The Handbook of Environmental Chemistry* / Eds. A.G. Kostianoy, A.N. Kosarev. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2005. P. 211–221, doi: 10.1007/698_5_011.
17. *Kouraev A.V., Cretaux J.-F., Lebedev S.A., Kostianoy A.G., Ginzburg A.I., Sheremet N.A., Mamedov R., Zakharova E.A., Roblou L., Lyard F., Calmant S., Berge-Nguyen M.* Satellite Altimetry Applications in the Caspian Sea // *Coastal Altimetry* / Eds. S. Vignudelli, A.G. Kostianoy, P. Cipollini, J. Benveniste. Berlin, Springer-Verlag, 2011. P. 331–366/ doi: 10.1007/978-3-642-12796-0_13.
18. *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* / Eds. S. Kenyon et al. Intern. Association of Geodesy Symposia 136. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2012. P. 833–841. doi: 10.1007/978-3-642-20338-1_105.
19. *Lebedev S.A., Kostianoy A.G.* Integrated using of satellite altimetry in investigation of meteorologic, hydrologic and hydrodynamic regime of the Caspian Sea // *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences. Special Iss. “Satellite Altimetry Over Land and Coastal Zones: Challenges and Applications”*. 2008. V. 19. N. 1–2. P. 71–82, doi: 10.3319/TAO.2008.19.1-2.116(SA).
20. *Lemoine F.G., Kenyon S.C., Factor J.K., Trimmer R.G., Pavlis N.K., Chinn D.S., Cox C.M., Klosko S.M., Luthcke S.B., Torrence M.H., Wang Y.M., Williamson R.G., Pavlis E.C., Rapp R.H., Olson T.R.* The development of the joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96: NASA Technical Memorandum. NASA/TP1998206861. 1998. 575 p.
21. *Medvedev P.P., Lebedev S.A., Tyupkin Yu.S.* An Integrated Database of Altimetry Satellite for Fundamental Geosciences Research // *Proc. 1st East-European Symp. Advances in Data Bases and Information Systems (ADBIS'97)*. St.-Petersburg, Russia, 25 September 1997. St.-Petersburg Univ. 1997. V. 2. P. 95–96.
22. *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). 3^d ed. 2006. 12 p.

Mean Sea Surface Model of the Caspian Sea

Sergey A. Lebedev ^{1,2}

¹ *Geophysical Center, Russian Academy of Sciences,
119296, Moscow, Molodezhnaya, 3,
e-mail: lebedev@wdbc.ru*

² *Space Research Institute, Russian Academy of Sciences
117997, Moscow, Profsoyuznaya, 84/32,
e-mail: sergey_a_lebedev@mail.ru*

Usually mean sea surface (MSS) is calculated by averaging altimetric measurements of sea surface height (SSH) over a given region and over a given time period. However, in the case of the Caspian Sea this represents a certain challenge and existing MSS models are unacceptable. One of the possible solutions is to analyse the Caspian Sea MSS as task of investigation of space-time variability of equipotential sea surface or SSH without seasonal and synoptic variability. Regional MSS model of the Caspian Sea (GCRAS11 MSS) was calculated according to the following scheme. For satellite altimetry data processing dry tropospheric correction was calculated on atmospheric pressure from nearest weather stations located along the Caspian Sea costal line. From the TOPEX/Poseidon (T/P) and Jason-1/2 (J1/2) satellite altimetry data, the SSH synoptic and seasonal variations for all passes of each repeat cycle were eliminated. In last phase, the GCRAS08 MSS was constructed as a SSH function of latitude, longitude, and time with correction for climatic dynamic topography. For specified time interval SSH was interpolated on grid by radial basis function method. For the first time GCRAS11 MSS model allows to investigate space-time variability of the Caspian Sea level. According to the received result spatial variability of rate of the Caspian Sea level change well correlates with EGM96 gravity anomalies field and the greatest variability is observed in the zone of gravity anomalies gradient maximum.

Keywords: satellite altimetry, Caspian Sea, TOPEX/Poseidon, Jason-1/2, mean sea surface, MSS GCRAS11.