

СПУТНИКОВЫЙ МОНИТОРИНГ КАСПИЙСКОГО МОРЯ

А.Г. Костяной, Л.И. Лобковский

(Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН)

Краткий обзор состояния проблемы.

В настоящее время большое внимание уделяется комплексному изучению Каспийского моря. Возрастающий интерес связан с тремя основными факторами. Во-первых, это резкие колебания уровня Каспия, во-вторых, интенсивное развитие добычи нефти и газа, и, в-третьих, катастрофическое изменение экосистемы моря в результате вселения гребневика мнемииопсиса (*Mnemiopsis leidyi*) и повышения средней температуры приповерхностного слоя моря. В результате существенно уменьшилась биопродуктивность Каспийского моря, что уже привело к резкому падению рыбных запасов и сокращению рыбопромыслового флота. Аналогичное причинно-следственное изменение функционирования экосистемы происходило и в Черном море в 90-х годах, где проводились комплексные исследования, включающие анализ спутниковых, метеорологических и гидрологических данных, позволившие контролировать экологическое состояние моря (Зацепин, Флинт, 2001). За последнее десятилетие в ходе выполнения ряда российских и международных проектов накоплен уникальный опыт работы с базовой термогидродинамической информацией о состоянии моря и отработаны новые методики исследования, которые следует применить для изучения экологического состояния и прогноза биопродуктивности Каспийского моря. Особую роль здесь играют спутниковые методы, позволяющие с высоким пространственно-временным разрешением регулярно получать необходимые термогидродинамические и метеорологические параметры одновременно на всей акватории моря, а не только в его российском секторе.

Спутниковый мониторинг прибрежных районов океана и внутренних морей является важнейшим методом контроля их экологического состояния. Он основан на приеме цифровых данных с различных радиометров (AVHRR, SeaWiFS, MODIS) и альтиметров, установленных на зарубежных спутниках (NOAA, OrbView-2, EOS AM-1, TOPEX/POSEIDON, ERS-2, Jason-1) и позволяющих получать информацию о поле ТПМ, взвеси, концентрации хлорофилла, а также об аномалиях уровня моря, изменчивости течений и скорости ветра с высоким пространственным и временным разрешением. Высокое содержание взвеси и интенсивное цветение фитопланктона может быть обусловлено как естественными факторами (сток рек, вынос из лагун и лиманов), так и антропогенным воздействием (сбросы промышленных предприятий, слив удобрений с полей). Поскольку вспышки цветения фитопланктона являются наиболее очевидными следствиями эвтрофикации, данные спутниковых наблюдений (данные радиометров SeaWiFS и MODIS) имеют огромное преимущество для экологического мониторинга Каспийского моря по сравнению с судовыми наблюдениями. Анализ получаемой информации позволяет оперативно отслеживать экологическую обстановку акватории, подверженной воздействию стоков различной природы, оценивать площадь и степень ее загрязненности и исследовать физические процессы, определяющие перенос загрязнений по изучаемым акваториям. Возможность обзора в короткие сроки огромных акваторий, а также возможность повторных наблюдений одного и того же региона с небольшим интервалом времени делают использование космической информации наиболее дешевым, оперативным и объективным методом экологического мониторинга морей и океанов.

Организация спутникового мониторинга Каспийского моря становится все более актуальной задачей, поскольку за последние 10 лет не только кардинально изменилась

геополитическая обстановка в регионе (Каспий теперь омывает берега 5 независимых государств), но и значительно уменьшился объем регулярных гидрологических работ в море, а также объем информации с метеостанций и постов Гидрометслужбы (Бедрицкий, Ходкин, Максимов, 2001). Поэтому современное состояние моря, не говоря уже о тенденциях его эволюции, в целом известны плохо. В последние годы с появлением доступных банков глобальной регулярной спутниковой информации и данных реанализа о поле температуры поверхности моря (ТПМ), уровне моря, концентрации хлорофилла, атмосферного давления, ветра, осадков, влажности, потоков тепла (PODAAC JPL, UT/CSR, NCEP, GSFC NASA, DAAC GSFC, и др.), появилась возможность изучения не только сезонной, но и межгодовой изменчивости всей акватории Каспийского моря. А это особенно важно как для изучения изменчивости регионального климата, эволюции термического и экологического состояния моря, так и для прямого регулярного (каждые 10 дней) слежения за уровнем различных частей Каспийского моря по альтиметрическим данным, что имеет важное народнохозяйственное значение.

Благодаря прогрессу в технологиях дистанционного зондирования океана из космоса стало возможным исследовать различные типы мезомасштабных вихрей и струй, представляющие собой эффективный механизм “самоочистения” прибрежных вод от загрязнений различной природы, механизм переноса вод, нитратов и планктона из прибрежных зон в сторону открытого океана (моря), значительно влияющий на продуктивность удаленных от берега районов. Это же относится и к изучению функционирования апвеллинговых зон Каспия, короткопериодной изменчивости (порядка суток) их мезомасштабной структуры, вихреобразования, динамики апвеллингового фронта, течений, поперечных струй и ячеек локального апвеллинга. Все эти процессы существенно влияют на биопродуктивность апвеллинговых районов Каспия в целом и требуют детального изучения.

Крупномасштабная и мезомасштабная циркуляция вод Каспия в современный период также плохо изучена из-за отсутствия регулярных гидрологических работ. Эта важная задача должна решаться как с помощью анализа альтиметрических данных об уровне моря, так и с помощью новейших, так называемых “неальтиметрических” методов восстановления поля скорости по серии инфракрасных спутниковых изображений (Afanasyev et al., 2002; Zavalov et al., 2002). Кроме того, важнейшим средством для исследования динамики вод является проведение специальных дрейфтерных экспериментов как это делается в Черном море на протяжении последних трех лет (1999-2002) (Motyzhev et al., 2000; Зацепин, Флинт, 2001; Afanasyev et al., 2002; Zatsepin et al., 2003).

Важнейшей задачей для мониторинга экологического состояния Каспийского моря является контроль за загрязнением водной поверхности нефтепродуктами в условиях нарастающего развития нефтегазодобывающей отрасли во всем Каспийском регионе. Для этой цели незаменимым средством дистанционного зондирования является радар с синтезированной апертурой (РСА), установленный на отечественном спутнике “Алмаз-М” и на зарубежных спутниках ERS-2, RADARSAT, ENVISAT. РСА позволяет (даже в условиях сплошной облачности) определять районы водной поверхности, покрытой нефтяной пленкой, следить за эволюцией разливов нефтепродуктов, а также определять скорость и направление перемещения нефтяных пятен.

Предлагаемый подход к комплексному мониторингу морских и океанских акваторий на протяжении последних лет успешно применяется в мировой практике. В Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН имеется уникальный разносторонний опыт проведения спутникового мониторинга Черного, Аральского, Средиземного

морей, а также Атлантического, Тихого и Индийского океанов для решения различных научных задач (Костяной, 1991, 1996, 2000; Гинзбург, 1994; Костяной, Бубнов, 1995; Kostianoy, 1996, 2001; Гинзбург и др., 1996, 1997, 1998а,б,в, 2000а,б,в, 2001а,б,в, 2002; Бубнов, Костяной, 1998; Гинзбург, Костяной, Островский, 1998; Незлин, Дьяконов, 1998; Kostianoy, Lutjeharms, 1999; Nezlin, Kostianoy, Gregoire, 1999; Ginzburg et al., 2000, 2002a,b; Djenidi et al., 2000; Afanasyev, Nezlin, Kostianoy, 2001; Зацепин, Флинт, 2001; Gregoire, Nezlin, Kostianoy, 2004; Nezlin et al., 2002, 2004). Начиная с 2002 г. этот опыт применяется к акватории Каспийского моря. Перспектива улучшения мониторинга связана с вводом в эксплуатацию новых спутниковых радиометров, таких как 36-канальный MODIS, новой альтиметрической аппаратуры, установленной на спутнике Jason-1, а также с открытием к свободному доступу новых глобальных баз данных реанализа океанографической и метеорологической информации.

Базы данных.

Каспийское море из-за большой меридиональной протяженности находится в пределах нескольких климатических зон с ярко выраженными сезонными и межгодовыми вариациями физических параметров. Кроме климатических факторов существенную роль в изменчивости гидрологического и экологического состояния Каспийского моря играет зарегулирование стока Волги (Михайлов, 2000). Современное состояние экосистемы Каспийского моря по оценкам Министерства природных ресурсов РФ, КаспНИРХ, ГОИН и Института океанологии РАН (Глумов, 2001; Гюль, 2001, Тарасов, 2001) является катастрофическим. Важнейшей задачей предстоящих исследований является разграничение эффектов антропогенного воздействия (зарегулирование стока, загрязнение и эвтрофикация вод) и естественной изменчивости регионального климата. Наиболее продуктивным способом ее решения является совместный анализ длительных рядов различных гидрофизических, гидрохимических, гидробиологических и метеорологических параметров Каспийского моря. Современный подход к решению этой проблемы заключается в использовании спутниковой информации и данных реанализа о поле температуры моря (ТПМ), об уровне моря, о содержании хлорофилла и взвеси, об атмосферном давлении, ветре, осадках и влажности. Эта информация с высоким пространственным (до 1 км) и временным (до 6 часов) разрешением может быть получена из американских и европейских глобальных баз данных (PODAAC JPL, UT/CSR, NCEP, GSFC NASA, DAAC GSFC, и др.) для последующего анализа (Рис. 1-5), как это уже неоднократно делалось для других морей и районов Мирового океана. Кроме того, необходимо использовать серии ежедневных спутниковых изображений Каспийского моря в видимом и инфракрасном диапазонах (Рис. 6-8), а также спутниковые изображения водной поверхности, полученные радаром с синтезированной апертурой.

Ниже перечислены основные базы данных океанографических и метеорологических параметров, которые необходимо использовать для комплексного анализа экологического состояния Каспийского моря:

1. Банк данных температуры поверхности океана (моря) (ТПМ) за период с 1981 г. по настоящее время (разрешение по времени 8 дней, пространственное разрешение 18 км) (JPL PODAAC).
2. Банк данных концентрации пигментов в поверхностном слое по данным радиометра CZCS, собранный в 1978-1986 гг. (разрешение по времени 1 месяц, пространственное разрешение 18 км) (GSFC DAAC).
3. Банк данных концентрации хлорофилла "а" в поверхностном слое по данным радиометра SeaWiFS (данные 3-го уровня) за период с сентября 1997 г. по

настоящее время (разрешение по времени 1 день, 8 дней, 1 месяц, пространственное разрешение 9 км) (GSFC DAAC).

4. Банк данных по дождевым осадкам за период с июля 1987 г. по декабрь 1997 г. (разрешение по времени 1 месяц, пространственное разрешение 1 градус, с 1998 г. – ежедневные данные) (GPCC).
5. Банк данных по ветру за период с марта 1997 г. по настоящее время (разрешение по времени 6 часов, пространственное разрешение 1 градус) (GSFC DAAC).
6. Банк данных по атмосферному давлению за период с марта 1997 г. по настоящее время (разрешение по времени 6 часов, пространственное разрешение 1 градус) (GSFC DAAC).
7. Банк данных по относительной влажности воздуха за период с марта 1997 г. по настоящее время (разрешение по времени 6 часов, пространственное разрешение 1 градус) (GSFC DAAC).
8. Банк данных по абсолютному влагосодержанию атмосферы за период с марта 1997 г. по настоящее время (разрешение по времени 6 часов, пространственное разрешение 1 градус) (GSFC DAAC).
9. Банк данных по уровню Мирового океана, геострофической скорости и скорости ветра по данным альтиметров TOPEX/POSEIDON, ERS-2, ERS-1, Jason-1 за период с 1992 г. по настоящее время (с 1992 по 1997 г. – ежедневно, с 1998 г. по настоящее время разрешение по времени – 3 дня, по пространству – 5 км) (ADАНР CCAR).
10. Спутниковые изображения Каспийского моря в инфракрасном и видимом диапазонах со спутников серии NOAA (с 1993 г. по настоящее время – ежедневно).

Основные направления исследований.

Анализ спутниковой цифровой информации NODS/MCSST (NASA Ocean Data System/Multi-Channel Sea Surface Temperature), полученной с помощью инфракрасных (ИК) каналов радиометров AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) спутников NOAA (разрешение по температуре – 0.1°C) за период с 1981 г. по настоящее время позволит исследовать сезонную и межгодовую изменчивость ТПМ Каспийского моря, установить существующие тренды и сравнить их с трендами, выявленными в аналогичных исследованиях в Атлантическом океане, Средиземном, Черном и Аральском морях (Kostianou, 1996; Костяной, 2000; Djenidi et al., 2000; Гинзбург, Костяной, Шеремет, 2001в, 2002). Например, интерполированные NODS/MCSST данные, относящиеся к ночному времени (для исключения эффектов дневного прогрева) и имеющие пространственное и временное разрешения 18 км и 1 неделя соответственно, уже использовались для построения средних сезонных полей ТПМ Черного моря и ее сезонной/межгодовой изменчивости в период с ноября 1981 по декабрь 1996 гг., что позволило выявить постоянный рост ТПМ со скоростью $0.1^{\circ}\text{C}/\text{год}$ (Гинзбург, Костяной, Шеремет, 2001в). Сопоставление результатов, полученных на основе спутникового и гидрологического массивов данных, показало их хорошее качественное, а на большей части акватории – и количественное соответствие. Это позволяет полагать, что непрерывно пополняемый массив NODS/MCSST со значительно более высокими по сравнению с гидрологическими съемками пространственным и временным разрешениями и огромным объемом данных, эквивалентным примерно 1 тыс. измерений по акватории моря в неделю, является надежной основой исследования термического состояния поверхностного слоя Каспийского моря, что имеет важное значение для прогноза его экологического состояния. Хотя сезонная изменчивость ТПМ Каспийского моря в целом в общих чертах известна, ее межгодовая изменчивость в масштабах всего бассейна и особенно его отдельных регионов практически не исследована из-за отсутствия необходимого

массива гидрологических измерений в разные годы и сезоны, большая часть которого относится к тому же к прибрежным районам. В настоящее время пополнение существующего массива гидрологических измерений, особенно для глубоководных районов, происходит лишь эпизодически, и изменения этой тенденции в будущем не предвидится. Поэтому основой такого исследования может стать спутниковая информация о ТПМ. Особое внимание следует уделить выявлению взаимной корреляции изменчивости ТПМ в различных бассейнах моря, связи временной изменчивости ТПМ и температуры воздуха, отклика ТПМ на глобальные события типа Эль-Ниньо, а также исследованию пространственно-временной изменчивости структуры, динамики и интенсивности прибрежного апвеллинга. Исследование корреляции изменчивости ТПМ в Восточной Атлантике, Средиземном, Черном, Каспийском и Аральском морях позволит проследить гипотетическое "трансконтинентальное" продвижение климатических аномалий от Атлантики до Центральной Азии и разграничить антропогенные и естественные климатические факторы влияющие на термохалинное и в конечном счете экологическое состояние Каспийского моря.

К настоящему времени получены весомые свидетельства того, что мезомасштабная вихревая динамика является фактором, определяющим важнейшие параметры черноморской экосистемы. Изучение циркуляции вод Черного моря на основе сочетания дистанционных спутниковых методов и контактных судовых измерений позволило установить, что существенную роль в процессах переноса и в формировании локальной гидрофизической и гидрохимической структуры играют мезомасштабные вихревые образования с характерными горизонтальными размерами 10-100 км (Гинзбург, 1994; Гинзбург и др., 1996, 1997, 1998а,б,в, 2000а,б,в, 2001а,б; Ginzburg et al., 2000, 2002а,б). Эти структуры спорадически возникают в различных районах моря, как в его центральной части, так и в прибрежной, между Основным Черноморским течением (ОЧТ) и берегом. Время их жизни составляет от одной-двух недель до нескольких месяцев, а связанные с ними мезомасштабные течения имеют скорость от единиц до десятков сантиметров в секунду. Исследования последних лет показали, что вихревая структура Черного моря значительно сложнее, чем считалось ранее. Здесь могут существовать многочисленные мезомасштабные антициклоны, циклоны и их комбинации (диполи и мультиполи) как над континентальным склоном (прибрежные), так и в глубоководном районе. Локальная циркуляция вод может существенно меняться на временных масштабах в несколько суток из-за перемещения вихрей, их взаимодействия, вовлечения струй между близко расположенными вихрями, разрушения диполей и образования новых. Есть все основания полагать, что в Каспийском море наблюдается аналогичная вихревая динамика.

Анализ продолжительных серий ежедневных спутниковых изображений поля ТПМ (AVHRR, NOAA) с высоким пространственным разрешением (1 км), карт цветности (SeaWiFS) и доступной гидрологической информации позволит выявить типичные для различных регионов Каспия когерентные структуры (струи, вихри, вихревые диполи), их роль в обмене теплом, массой и импульсом между прибрежной зоной и глубоководным бассейном, связь формирования и эволюции этих структур с локальными гидродинамическими и атмосферными процессами, а также их влияние на пространственную неоднородность в распределении хлорофилла, взвеси и загрязнений. Следует определить пространственно-временные и кинематические характеристики когерентных структур и определяющие ее факторы, а также выполнить количественные оценки осуществляемого этими структурами водообмена по методике, разработанной в (Зацепин, Костяной, 1992; Kostianoy, Zatsepin, 1996).

Как показывает опыт исследований, вихревые образования вносят определяющий вклад в горизонтальный водообмен между шельфовой зоной и глубоководными районами моря, а также в трансшельфовый перенос. Есть основания полагать, что и в Каспийском море вихревой обмен может иметь определяющее значение во взаимодействии различных участков экосистемы, транспорте биогенов и в формировании биологической продуктивности бассейна. Таким образом, изучение мезомасштабной вихревой динамики и ее влияния на процессы внутрибассейнового водообмена в Каспийском море является важнейшей практической и научной задачей. Однако, статистика наблюдений за мезомасштабными вихревыми образованиями пока невелика. Недостаточно изучена их взаимосвязь и взаимодействие с основными элементами циркуляции, осуществляемый ими перенос загрязнений, биогенов, фито- и зоопланктона, а также ряд других важных вопросов, связанных с влиянием мезомасштабной вихревой динамики на каспийскую экосистему. Достаточно полное и систематическое исследование этого круга вопросов на основе использования натуральных данных в масштабе всей акватории моря, по-видимому, ранее не предпринималось.

Малая изученность мезомасштабной циркуляции Каспийского моря связана в первую очередь с недостаточностью существующих натуральных данных о полях скорости. Объем имеющихся данных, их пространственное и временное разрешение не соответствуют современному уровню потребностей в информации о циркуляции в Каспии. Это связано с тем, что измерение течений традиционными средствами, такими как дрейферы, механические или акустические (доплеровские) датчики скорости, является технически достаточно сложной и весьма дорогостоящей операцией. Отсутствие регулярных масштабных гидрологических съемок не позволяет рассчитывать геострофические скорости течений, при этом сам метод имеет ряд известных существенных недостатков. Особое значение в связи с этим приобретают методы дистанционного зондирования скорости. Кроме того, контактные наблюдения в каждом случае могут обеспечить данные о течениях лишь в отдельно взятой точке или небольшой области моря, а расчет скоростей дает усредненную и искаженную картину течений. В противоположность этому, спутниковые методы в принципе способны дать информацию о полях скорости в масштабе акватории в целом, на качественно новом уровне временного разрешения порядка нескольких часов и пространственного разрешения порядка нескольких километров.

Методы спутникового зондирования поверхностных течений возникли в 80-х годах, в связи с общим развитием космических технологий и растущей потребностью общества в океанографической информации. К числу таких методов относятся в первую очередь альтиметрические, которые справедливо считаются (особенно после запуска высокоточного альтиметра TOPEX/POSEIDON) одним из главных направлений развития современной динамической океанографии. Несмотря на ряд ограничений, спутниковые альтиметрические данные позволят исследовать региональную сезонную и межгодовую изменчивость абсолютного уровня Каспия, региональных аномалий уровня моря и течений, динамической топографии и вихревой динамики начиная с 1992 года с периодичностью в 10 дней и разрешением 5 км по пространству. С запуском нового спутника Jason-1 в 2002 г. произошло значительное увеличение точности измерений уровня моря.

Параллельно необходимо развивать и альтернативные, “неальтиметрические” спутниковые методы исследования полей течений. Основное внимание следует уделять совершенствованию двух спутниковых методов: техники максимальной кросс-корреляции (МКК), позволяющей получать поля скорости на базе корреляционного анализа последовательных спутниковых изображений (Afanasyev et al., 2002; Zavialov et

al., 2002), и метода, основанного на применении к парам инфракрасных изображений обращённого уравнения локального теплового баланса (Ostrovsky, Piterbarg, 1995; Zavialov, Ghisolfi, Garcia, 1998). Обе методики появились в последнее десятилетие, и в настоящее время привлекают в мире большой интерес, как потенциально исключительно мощное средство изучения морских течений, с недостижимыми ранее временным и пространственным разрешениями. В России эти методы до последнего времени систематически не разрабатывались. Методика МКК состоит в выделении некоторого корреляционного “окна” вокруг интересующего пикселя первого изображения пары спутниковых ИК-изображений. Это окно затем перемещается по всем пикселям второго изображения, для определения положения, в котором достигается максимальное значение коэффициента кросс-корреляции с исходной областью первой “картинки”. Таким образом определяется вектор перемещения, из которого, зная величину интервала времени, разделяющего два изображения, легко получить среднюю скорость. Органическим недостатком этого метода является невозможность адекватного воспроизведения той компоненты скорости, которая параллельна изолиниям изображения. Действительно, перемещение вдоль изолиний как бы переводит любую структуру “в себя”, и потому не распознается описанным корреляционным методом. Именно поэтому стандартная техника МКК не всегда приводит к реалистическим результатам, и, кроме того, имеет склонность к занижению абсолютных значений скорости. В 2000 г. в ИОРАН была предложена существенная модификация метода МКК, позволяющая обойти эти трудности и существенно повысить эффективность и надежность расчетов (Zavialov et al., 2002). Дальнейшее развитие этого подхода (например, применение метода МКК к изображениям в видимой части спектра (поля взвеси и хлорофилла)) и его широкое применение к исследованию мезомасштабной циркуляции Каспийского моря является одной из важнейших задач предстоящих исследований. Так, например, использование каналов видимого диапазона предпочтительнее при исследовании динамики речного стока и плюмажей крупных рек, таких как Волга, которые часто мало отличаются от окружающих морских вод по температуре, но очень сильно - по оптическим характеристикам.

Вторая группа неальтиметрических методов спутникового зондирования течений основана на обращении уравнения локального теплового баланса (Ostrovsky, Piterbarg, 1995; Zavialov et al., 1998). Суть метода состоит в рассмотрении наблюдаемых изменений полей температуры верхнего слоя океана (моря) за определённый период времени. Исходя из этих данных и с помощью уравнения сохранения тепла, проинтегрированного по “z” в пределах верхнего квазиоднородного слоя, можно найти поле “остаточного” потока тепла, который необходим для того, чтобы объяснить наблюдавшиеся изменения ТПО. Таким образом, проинтегрированное по всей толщине верхнего квазиоднородного слоя уравнение сохранения количества тепла позволяет рассчитать поля адвекции в верхнем слое океана (моря). После этого может быть поставлена обратная задача о реконструкции полей скорости, исходя из наблюдаемых полей ТПО и рассчитанных полей адвекции. Температура и адвекция вместе задают проекцию скорости на направление градиента температуры, т.е. лишь компоненту течения, перпендикулярную изотермам, тогда как компонента, параллельная изолиниям ТПО, находится в “нулевом пространстве” инверсии и не может быть определена таким способом. Однако, после того, как поперечные изотермам компоненты найдены во всех точках, продольные компоненты могут быть вычислены с помощью уравнения неразрывности и граничных условий.

Важнейшей задачей исследования динамики вод Каспийского моря является организация и проведение специализированного дрейферного эксперимента, как это

делается на протяжении последних четырех лет (1999-2002 гг.) в Черном море (Motyzhev et al., 2000; Зацепин, Флинт, 2001; Afanasyev et al., 2002; Zatsepin et al., 2003). Эти данные необходимы также и для валидации результатов дистанционных альтиметрических и неальтиметрических методов исследования полей течений. Предлагается использовать лагранжевые SVP и SVP-B дрейферы верхнего слоя моря со спутниковым определением координат и передачи данных (Sybrandy, Niiler, 1991; Motyzhev et al., 2000). Именно поэтому, дрейферные эксперименты также относятся к дистанционным спутниковым методам мониторинга. Эти дрейферы обладают большим подводным парусом и в физическом смысле являются квази-лагранжевыми частицами, «вмороженными» в окружающую их водную массу. Кроме того, размещенные в их поплавках датчики температуры поверхности воды (SVP дрейферы), а также датчики атмосферного давления (SVP-B дрейферы) благодаря спутниковой связи позволяют передавать информацию о текущих значениях этих гидрометеорологических параметров практически в реальном времени. Надежность работы системы дрейфер-спутник и сравнительно низкая стоимость дрейферов и спутниковой связи сделало их весьма распространенным средством изучения Мирового океана. К настоящему времени несколько тысяч дрейферов уже отработали и продолжают работать в различных океанах и морях, включая Средиземное море. Основными целями такого эксперимента в Каспийском море станет изучение макро- и мезомасштабной динамики вод, а также оперативное получение гидрометеорологических данных для улучшения предсказания погодных условий в каспийском регионе.

Наконец остановимся на радиолокационных (РЛ) методах, предоставляющих огромные возможности с точки зрения получения информации о мгновенном состоянии поверхности моря. Возможность регистрации процессов, происходящих в верхнем слое океана (моря), обусловлена рассеивающими свойствами морской поверхности и связана с уникальной чувствительностью радиоволн к мелкомасштабным ветровым волнам. Главным «визуализирующим» фактором служат короткие гравитационно-капиллярные волны с длиной от нескольких сантиметров до одного метра, практически всегда присутствующие на поверхности океана. Основным физическим механизмом, определяющим обратное рассеяние РЛ-сигнала на морской поверхности, является брэгговское рассеяние на поверхностных волнах, длина которых сравнима с длиной волны радиолокатора. Различные динамические процессы, протекающие в верхнем слое океана, вызывают изменения спектральных характеристик этих волн. Радиолокатор регистрирует пространственную изменчивость мелкомасштабных ветровых волн в виде картин распределения интенсивности отраженного сигнала – радиолокационных изображений (РЛИ). Первые космические РЛИ океана, полученные в 1978 г. радиолокатором с синтезированной апертурой на американском космическом аппарате SEASAT, произвели настоящую сенсацию в океанологии и позволили по-новому взглянуть на процессы и явления, формирующие различные неоднородности на поверхности океана. В настоящее время исследования поверхностного волнения, взаимодействия морских волн с течениями, фронтов и фронтальных зон, динамики поверхностных загрязнений в Каспийском море, а также определение границ ледового покрова, разлива рек и водоемов, нагонов не представляются возможными без применения методов активного радиолокационного зондирования, имеющих пространственное разрешение порядка 10 м.

Заключение.

Мировой опыт свидетельствует о возрастающей роли и эффективности использования разнообразных спутниковых методов мониторинга морских акваторий. Каспийское море по ряду причин оказалось за рамками постоянно действующего

мониторинга термохалинного, динамического и экологического состояния. В результате современное состояние моря, не говоря уже о тенденциях его эволюции, в целом известны плохо. Интенсивное развитие добычи нефти и газа, катастрофическое изменение экосистемы моря в результате вселения гребневика мнемипсиса (*Mnemiopsis leidy*), повышение средней температуры приповерхностного слоя моря и изменчивость уровня моря заставляют обратиться к спутниковым методам мониторинга и к базам данных реанализа океанографических и метеорологических параметров, позволяющим с высоким пространственно-временным разрешением регулярно и оперативно получать необходимые термогидродинамические и метеорологические параметры одновременно на всей акватории моря, а не только в его российском секторе. Кроме того, это позволит восполнить пробелы в сети наблюдений и продолжить изучение изменчивости регионального климата, эволюции термодинамического и экологического состояния моря, уровня моря и основных метеорологических параметров, загрязнения моря, а также состояния рыбных ресурсов, что имеет важное народнохозяйственное значение для всех стран каспийского региона.

Работа выполнена при поддержке ФЦНТП “Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития науки и техники гражданского назначения” Минпромнауки РФ, ФЦП “Мировой океан”, а также гранта РФФИ N 03-05-96630, 02-05-64949.

А.Г. Костяной, д.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН

Л.И. Лобковский, д.ф.-м.н., заместитель директора Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Нахимовский пр. 36, 117997 Москва
Тел: 124.88.10, факс: 124.59.83, E-mail: kostianoy@online.ru

Литература

- Бедрицкий А.И., Ходкин С.С., Максимов А.А. Основные принципы обеспечения хозяйственной и природоохранной деятельности в Каспийском регионе данными и информацией о погодноклиматических и гидрометеорологических условиях и загрязнении природной среды Каспийского моря. – Вестник Каспия. 2001. N 5. С.96-115.
- Бубнов Г.Г., Костяной А.Г. Исследование локальных ячеек Бенгельского апвеллинга по спутниковым данным. - Исследование Земли из космоса. 1998. N 5. С.47-54.
- Гинзбург А.И. Процессы горизонтального обмена в приповерхностном слое Черного моря. - Исследование Земли из космоса. 1994. N 2. С.75-83.
- Гинзбург А.И., Зацепин А.Г., Костяной А.Г., Кривошея В.Г., Скирта А.Д., Соловьев Д.М., Станичный С.В., Шеремет Н.А., Шиганова Т.А., Якубенко В.Г., Грегуар М. Антициклонические вихри в глубоководной восточной части Черного моря летом-осенью 1999 г. (спутниковые и судовые наблюдения). - Исследование Земли из космоса. 2001а. N 5. С.3-11.
- Гинзбург А.И., Контарь Е.А., Костяной А.Г., Кривошея В.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В., Лаптев С.Ю. Система синоптических вихрей над свалом глубин в северо-западной части Черного моря летом 1993 г. (спутниковая и судовая информация). – Океанология. 1998а. Т.38. N 1. С.56-63.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Кривошея В.Г., Незлин Н.П., Соловьев Д.М., Станичный С.В., Якубенко В.Г. Особенности динамики вод и распределения хлорофилла «а» в северо-восточной части Черного моря осенью 1997 г. - Океанология. 2000а. Т.40. N 3. С.344-356.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Незлин Н.П., Соловьев Д.М., Станичная Р.Р., Станичный С.В. Антициклонические вихри над северо-западным материковым склоном Черного моря и их роль в переносе богатых хлорофиллом шельфовых вод в глубоководный бассейн. - Исследование Земли из космоса. 2000б. N 3. С.71-81.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Незлин Н.П., Соловьев Д.М., Станичный С.В. Эволюция антициклонического вихря в северо-восточной части Черного моря летом-осенью 1993 г. - Исследование Земли из космоса. 2001б. N 2. С.69-75.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Островский А.Г., 1998. Поверхностная циркуляция Японского моря (спутниковая информация и данные дрейфующих буев). – Исследование Земли из космоса. 1998. N 1. С.66-83
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В. Эволюция антициклонических вихрей в северо-западной части Черного моря. - Исследование Земли из космоса. 1996. N 4. С.67-76.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В. Прибрежный апвеллинг в северо-западной части Черного моря. - Исследование Земли из космоса. 1997. N 6. С.61-72.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В. Циклонические вихри апвеллингового происхождения у юго-западной оконечности Крыма. - Исследование Земли из космоса. 1998б. N 3. С.83-88.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В. Изменчивость вихревой картины в юго-восточной части Черного моря. - Исследование Земли из космоса. 1998в. N 6. С.3-15.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В. Эволюция вихрей и струй в северо-восточной части Черного моря осенью 1997 г. (спутниковые наблюдения). – Исследование Земли из космоса. 2000в. N 1. С.3-14.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Шеремет Н.А. Об использовании спутниковых данных в исследовании сезонной и межгодовой изменчивости температуры поверхности Черного моря. - Исследование Земли из космоса. 2001в. N 1. С.51-61.
- Гинзбург А.И., Костяной А.Г., Шеремет Н.А. Термический режим Аральского моря в современный период (1982-2000) по спутниковым данным. - Исследование Земли из космоса. 2002. N 4. С.62-69.
- Глумов И.Ф. Современное состояние экосистем и хозяйственное освоение природных ресурсов Каспийского моря. - Вестник Каспия. 2001. N 5. С.70-77.
- Гюль А.К. Экологическое районирование Каспия. - Вестник Каспия. 2001. N 5. С.116-119.
- Зацепин А.Г., Костяной А.Г. Об интенсивности трансфронтального водообмена в океане. - Доклады РАН. 1992. Т. 323. N 5. С.949-952.
- Зацепин А.Г., Флинт М.В. (Ред.). Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря. М.: Наука, 2001.
- Костяной А.Г. Система поперечных струй Канарского апвеллинга. - Исследование Земли из космоса. 1991. N 5. С.78-86.
- Костяной А.Г. Применение спутниковых данных для анализа фронтов юго-восточной Атлантики (на примере Анголо-Бенгельской фронтальной зоны). - Исследование Земли из космоса. 1996. N 4. С.77-86.

- Костяной А.Г. Структурообразующие процессы в апвеллинговых зонах. – Дисс. на соиск. уч. степ. д.ф.-м.н., М.: ИОРАН, 2000, 317 с.
- Костяной А.Г., Бубнов Г.Г. Исследование поперечных струй Бенгельского апвеллинга по спутниковым данным. - Исследование Земли из космоса. 1995. N 4. С.67-75.
- Михайлов В.Н. Загадки Каспийского моря. Соросовский образовательный журнал. 2000. Т.6. N 4. С.63-70.
- Незлин Н.П., Дьяконов В.Ю. Анализ многолетних изменений концентрации хлорофилла в поверхностном слое Черного моря по данным CZCS-радиометра. - Океанология. 1998. Т.38. N 5.
- Тарасов А.Г. Вселение мнемниопсиса в Каспий: основные итоги 2001 г. - Вестник Каспия. 2001. N 5. С.120-126.
- Afanasyev Ya.D., Kostianoy A.G., Zatsepin A.G., Poulain P.-M. Analysis of velocity field in the Eastern Black Sea from satellite data during the "Black Sea-99" Experiment. - J. Geophys. Res. – Oceans. 2002. V.107. N C8. (10.1029/2000JC000578).
- Afanasyev Ya.D., Nezlin N.P., Kostianoy A.G. Patterns of seasonal dynamics of remotely sensed chlorophyll in the Newfoundland Region. - Remote Sensing of the Environment. 2001. N 76. P.268-282.
- Djenidi S., Kostianoy A.G., Sheremet N., Elmoussaoui A. Seasonal and interannual SST variability of the North-East Atlantic Ocean. – In: "Oceanic Fronts and Related Phenomena" (Konstantin Fedorov International Memorial Symposium), IOC Workshop Report Series, N 159, UNESCO, 2000, P.99-105.
- Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Soloviev D.M., Stanichny S.V. Remotely sensed coastal-deep basin water exchange processes in the Black Sea. – In: Satellites, Oceanography and Society, Ed. D.Halpern, Elsevier Oceanography Series N63, Elsevier Science Publishers, NY, 2000, P.273-287.
- Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Krivosheya V.G., Nezlin N.P., Soloviev D.M., Stanichny S.V., Yakubenko V.G. Mesoscale eddies and related processes in the northeastern Black Sea. – J. Marine Systems. 2002a. V.32. N 1-3. P.71-90.
- Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Nezlin N.P., Soloviev D.M., Stanichny S.V. Anticyclonic eddies in the northwestern Black Sea. – J. Marine Systems. 2002b. V.32. N 1-3. P.91-106.
- Gregoire M., Nezlin N.P., Kostianoy A.G. Modeling the nitrogen cycling and plankton productivity in the Black Sea using a three-dimensional interdisciplinary model. – J. Geophys. Res. 2004 (accepted).
- Kostianoy A.G. Investigation of the Sicilian upwelling on the base of satellite data. - Technical Report, Stazione Oceanografica CNR, La Spezia, Italy, November 1996, 99 pp.
- Kostianoy A.G. Spatial and seasonal variability of the SST fronts in the Southern Indian Ocean. – Technical Report, SSTC Research Fellowship, Liege University, Belgium, 15 January 2001, 229 pp.
- Kostianoy A.G., Lutjeharms J.R.E. Atmospheric effects in the Angola-Benguela frontal zone. - J. Geophys. Res. 1999. V. 104. N C9. P. 20,963-20,970.
- Kostianoy A.G., Zatsepin A.G. The West African coastal upwelling filaments and cross-frontal water exchange conditioned by them. - J. Mar. Systems. 1996. V.7. N 2-4. P.349-359.
- Motyzhev S.V., Poulain P.-M., Zatsepin A.G., Fayos C., Kostianoy A.G., Maximenko N.A., Poyarkov S.G., Soloviev D.M., Stanichny S.V. New phase of drifter experiment in the Black Sea. – Global Drifting Buoy Observations – 2000, A DBCP Implementation Strategy. DBCP Technical Document Series, WMO, Geneva, 2000, N 16.
- Nezlin N.P., Afanasyev Ya.D., Ginzburg A.I., Kostianoy A.G. Remotely sensed studies of phytoplankton dynamics under physical forcing in different ocean regions. – Advances in Space Research. 2002. V.29. N 1. P.99-106.
- Nezlin N.P., Kostianoy A.G., Gregoire M. Patterns of seasonal and interannual changes of surface chlorophyll concentration in the Black Sea revealed from the remote sensed data. - Remote Sensing of the Environment. 1999. N 69. P.43-55.
- Nezlin N.P., Lacroix G., Kostianoy A.G., Djenidi S. Remotely sensed seasonal dynamics of phytoplankton in the Ligurian Sea in 1997-1999. – J. Geophys. Res. 2004 (submitted).
- Ostrovsky A., Piterbarg L., 1995. Inversion for heat anomaly transport from sea surface temperature time series in the northwest Pacific. - J. Geophys. Res. V.100. N . P.4845-4865.
- Sybrandy, A.L. and Niiler P.P., 1991. WOCE/TOGA Lagrangian Drifter Construction Manual. University of California, Scripps Institution of Oceanography, La Jolla, California 92093.
- Zatsepin A.G., Ginzburg A.I., Kostianoy A.G., Kremenetskiy V.V., Krivosheya V.G., Stanichny S.V., Poulain P.-M. Observations of Black Sea mesoscale eddies and associated horizontal mixing. – J. Geophys. Res. 2003. V.108. NC8. 3246. doi:10.1029/2002JC001390.
- Zavialov P.O., Ghisolfi R.D., Garcia C.A.E. An inverse model for seasonal circulation over the Southern Brazilian shelf: near-surface velocity from the heat budget. - Journal of Physical Oceanography. 1998. V.28. N 4. P.545-562.
- Zavialov P.O., Grigorieva J.V., Moller O.O., Kostianoy A.G., Gregoire M. Continuity preserving modified maximum cross-correlation technique. – J. Geophys. Res. – Oceans. 2002. V.107. N C10.

Список рисунков.

- Рис.1. Средняя температура ($^{\circ}\text{C}$) поверхности Каспийского моря в июне 2001 г. по данным радиометра AVHRR (NOAA).
- Рис.2. Средняя концентрация хлорофилла ($\text{мг}/\text{м}^3$) в поверхностном слое Каспийского моря в июне 2001 г. по данным радиометра SeaWiFS (OrbView-2).
- Рис.3. Среднее атмосферное давление (мб) в Каспийском регионе в июне 2001 г.
- Рис.4. Средняя скорость (м/с) и направление ветра в Каспийском регионе в июне 2001 г.
- Рис.5. Среднее количество осадков (мм/день), выпавших в Каспийском регионе в июне 2001 г.
- Рис.6. Температура поверхности ($^{\circ}\text{C}$) Каспийского моря 5 июня 2001 г. (2:20 GMT) по данным NOAA-14.
- Рис.7. Изображение Каспийского моря в комбинации видимых диапазонов 15 сентября 2001 г. (10:00 GMT) по данным NOAA-16.
- Рис.8. Концентрация хлорофилла ($\text{мг}/\text{м}^3$) в поверхностном слое Каспийского моря 14 июня 2001 г. по данным радиометра SeaWiFS (OrbView-2).

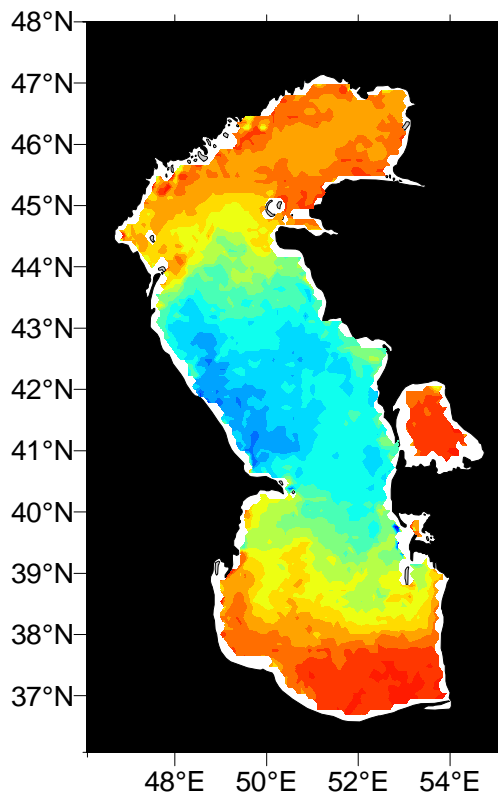


Рис.1. Средняя температура (°C) поверхности Каспийского моря в июне 2001 г. по данным радиометра AVHRR (NOAA).

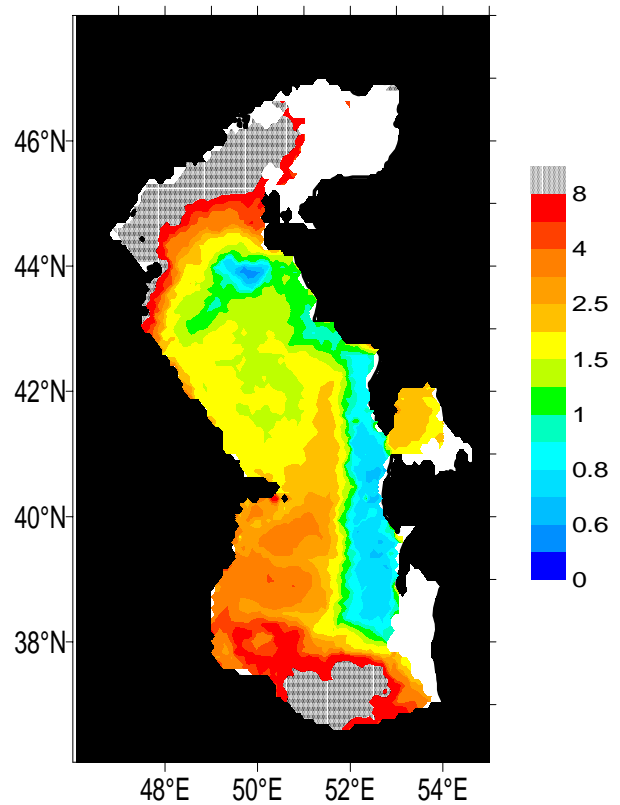


Рис.2. Средняя концентрация хлорофилла (мг/м³) в поверхностном слое Каспийского моря в июне 2001 г. по данным радиометра SeaWiFS (OrbView-2).

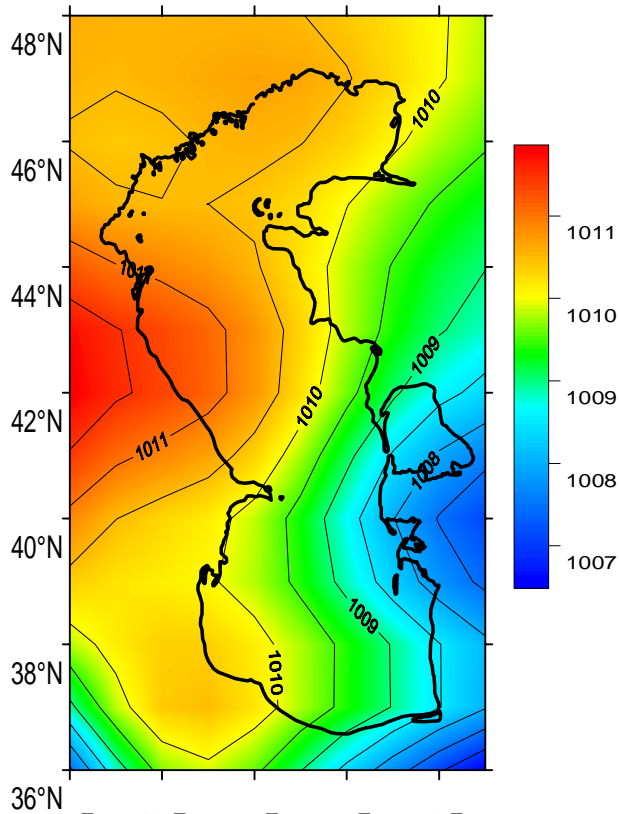


Рис.3. Среднее атмосферное давление (мб) в Каспийском регионе в июне 2001 г.

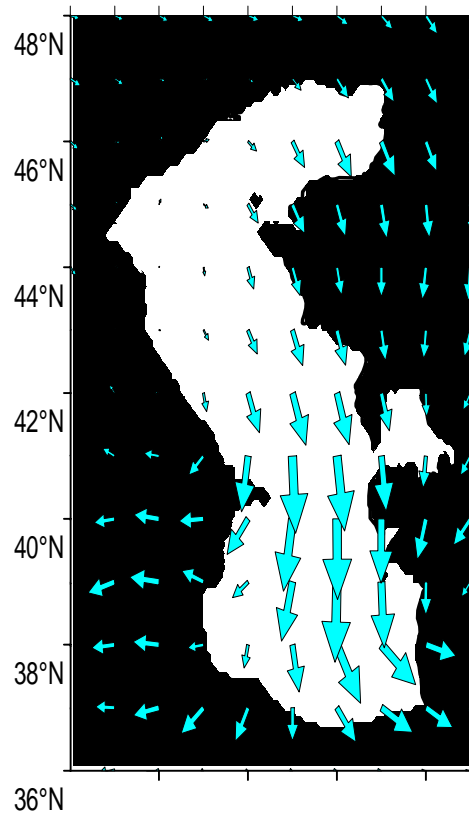


Рис.4. Средняя скорость (м/с) и направление ветра в Каспийском регионе в июне 2001 г.

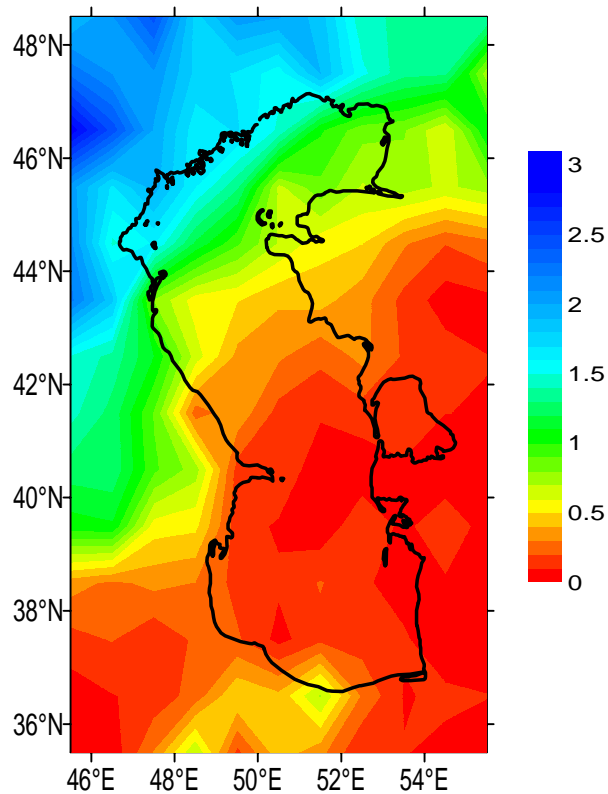


Рис.5. Среднее количество осадков (мм/день), выпавших в Каспийском регионе в июне 2001 г.

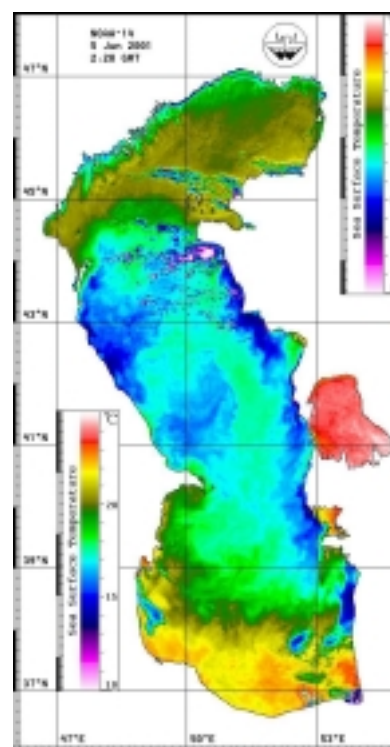


Рис.6. Температура поверхности (°C) Каспийского моря 5 июня 2001 г. (2:20 GMT) по данным NOAA-14.

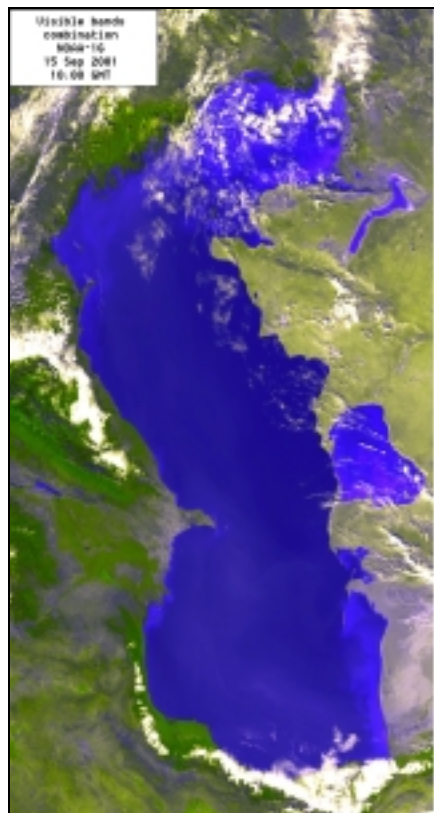


Рис.7. Изображение Каспийского моря в комбинации видимых диапазонов 15 сентября 2001 г. (10:00 GMT) по данным NOAA-16.

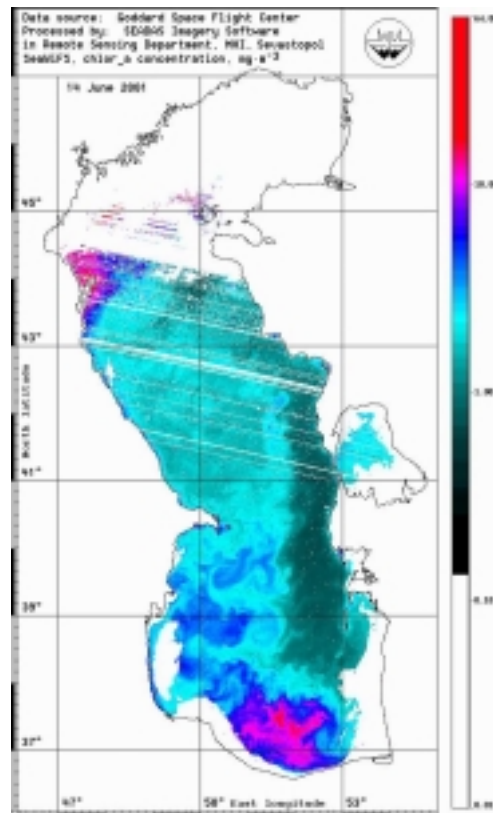


Рис.8. Концентрация хлорофилла ($\text{мг}/\text{м}^3$) в поверхностном слое Каспийского моря 14 июня 2001 по данным радиометра SeaWiFS (OrbView-2).

