

Ледовая обстановка в Керченском проливе в текущем столетии. Ретроспективный анализ на основе спутниковых данных

О.Ю. Лаврова¹, М.И. Митягина¹, А.Г. Костяной^{2,3}

¹Институт космических исследований РАН, Москва, 117997, Россия

²Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия

³Московский университет им. С.Ю. Витте, Москва, 115432, Россия

E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

Представлены результаты ретроспективного анализа радиолокационных и оптических спутниковых данных, проведенного с целью оценки ледовой обстановки в Керченском проливе за период 1999–2017 гг. Выявлено, что для 2000-х гг. стали характерны более частые по сравнению с предыдущими годами холодные зимы, а становление льда происходило в более поздний период, в основном в конце января – начале февраля, но при этом в отдельные годы, например, в 2012 г., лед наблюдался до середины марта. При понижении температуры воздуха и сильном ветре северо-восточного и восточного направлений образование ледового покрова в проливе происходило очень быстро, а при проникновении южных циклонов лед в нем столь же быстро таял. Как правило, в течение одной зимы наблюдалось несколько волн холода, каждая из которых приводила к образованию нового ледового покрова. Особое внимание в статье уделяется анализу ледовой обстановки в январе–феврале 2017 г. и оценке влияния конструкций строящегося моста через Керченский пролив на распространение дрейфующего льда. До строительства моста в холодные зимы лед свободно дрейфовал из Азовского моря на юг вдоль западного побережья пролива, а строительство моста существенно повлияло на дрейф льда.

Две волны холода, достигшие Азовского моря в конце января и в первой половине февраля 2017 г., привели сначала к образованию льда практически на всей акватории моря, а затем к его сплочению и сносу в южную часть моря благодаря сильным ветрам северных румбов. В результате Керченский пролив был забит льдом, который не выносился в Черное море, поскольку строящийся Крымский мост сыграл роль плотины, которая практически не пропускала лед между опорами моста. Последовательные ежедневные спутниковые радиолокационные и оптические изображения высокого пространственного разрешения, полученные в период с 30 января по 17 февраля 2017 г., позволили детально проследить ледовую обстановку в районе моста через Керченский пролив. Вызывает определённую обеспокоенность тот факт, что лед не проходил между опорами моста и всей своей массой (при северных ветрах 10–15 м/с и течениях 30–40 см/с) давил на опоры. Неизвестно, был ли этот эффект предусмотрен и смоделирован специалистами при расчетах конструкции моста, но совершенно очевидно, что теперь потребуется ежегодный спутниковый мониторинг ледовой обстановки в Керченском проливе.

Ключевые слова: Керченский пролив, Азовское море, Крымский мост, спутниковый мониторинг, радиолокационные изображения, оптические изображения, ледовая обстановка

Одобрена к печати: 18.04.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-148-166

Введение

Ежегодно Азовское море частично или полностью покрывается льдом. Малые глубина и теплозапас замерзающего Азовского моря определяют зависимость изменчивости его ледового режима от зимней температуры воздуха и, соответственно, суровости зим. На протяжении примерно 120 лет наблюдений заметно менялось соотношение периодов с суровыми, умеренными и мягкими зимами (сумма среднесуточных отрицательных температур за сезон более 400°C; менее 400°C и более 200°C; и менее 200°C по модулю соответственно). Учитывая тенденцию увеличения в среднем температуры воздуха и воды Азовского моря в современный период, можно ожидать соответствующего уменьшения его ледовитости, что не исключает экстремальных явлений, связанных с резким понижением температуры воздуха и сильными ветрами северных румбов, наблюдавшимися, например, в январе–феврале 2012 и 2014 годов, когда даже прибрежные участки Черного моря покрылись льдом в Керчи, Евпатории, Новороссийске, Одессе и Констанце (Костяной и др.,

2014). Во временном ходе максимальной толщины льда в период 1926–2010 гг. заметно ее уменьшение в современный период, например, в суровую зиму 1968–1969 гг. в Мариуполе она составляла 70 см, в холодные зимы 2002–2003, 2005–2006 и 2007–2008 годов – соответственно 50, 40 и 35 см (Костяной и др., 2014). В суровую зиму 1953–1954 гг. лед был настолько крепким, что по нему можно было перейти Цемесскую бухту в Новороссийске и Севастопольскую бухту в Севастополе.

В районе Керченского пролива образование ледяного покрова начинается обычно в Таманском и Керченском заливах и в виде припая вдоль западного побережья пролива, а также с северной стороны о. Тузла. В морозные зимы при сильных северных и северо-восточных ветрах лед выносился даже в Черное море.

Мониторинг ледовой обстановки в Керченском проливе чрезвычайно важен с практической точки зрения. Керченский пролив, соединяющий Азовское и Черное моря, является зоной активного судоходства, на его берегах расположено несколько крупных портовых комплексов. Согласно данным службы системы управления движения судов Керченского пролива (http://www.rosmorport.ru/nvr_serv_nav.html) в 2013, 2014 и 2015 годах через него прошло 11353, 10952 и 9969 судов соответственно (Лаврова и др., 2016).



Рис. 1. Керченский пролив на радиолокационном изображении SAR-C Sentinel-1B от 17 апреля 2017 г. (VV-поляризация, пиксельное разрешение 9,8 м)

Важной транспортной артерией является Керченская паромная переправа, соединяющая порт «Кавказ» (Краснодарский край) и порт «Крым» (Республика Крым) (рис. 1). Сложные погодные условия, связанные с установлением льда в проливе и обледенением

судов, создают серьезные проблемы для судоходства. Так, например, в середине февраля 2017 г. на керченской паромной переправе резко обострилась проблема с движением паромов во льду. На четыре дня с 16 по 19 февраля паромы грузовой паромной линии прекратили свои перевозки, 2 парома застряли во льдах пролива из-за внезапных ухудшений погоды, пришлось задействовать 2 ледокола. На грузовой переправе скопилось более тысячи фура (http://kerchinfo.com/lyod-prodolzhaet-sozdavat-problemy-v-rabote-kerchenskoj-pererepravu.html). Огромное количество судов ожидало улучшения ледовой обстановки на якорной стоянке в черноморском предпроливье.

Особую актуальность задача мониторинга ледовой обстановки приобрела в связи со строительством Крымского моста (рис. 1). Как показали результаты наших спутниковых наблюдений, строительство моста через Керченский пролив, которое сопровождалось строительством транспортного перехода на Таманском полуострове (Тузлинская дамба) длиной 5 км, мостом между дамбой и о. Тузла (1,4 км), транспортным переходом по о. Тузла (6,5 км) и мостом между о. Тузла и Керчью (6,1 км), фактически перегородило Керченский пролив и стало преградой для свободного дрейфа льда из Азовского моря (Лупян и др., 2017).

Хотелось бы напомнить исторический факт, что первый полудеревянный железнодорожный мост через Керченский пролив был построен осенью 1944 г. сразу после освобождения советскими войсками Крыма, но уже в феврале 1945 г., через 3 месяца после его открытия, в результате ледохода он был разрушен, а затем разобран. Сильный северо-восточный ветер нагнал лед толщиной 0,5–1 м в пролив, который 18 февраля 1945 г. разрушил 32 опоры моста, которые не имели ледорезов. Интересно, что за несколько дней до разрушения моста по нему прошел поезд с советской делегацией, возвращавшейся с Ялтинской конференции, которая закончилась 11 февраля 1945 г. (Grinevetskiy et al., 2015). Современные технологии и материалы позволяют осуществлять строительство ледоустойчивых конструкции, однако знание ледовой обстановки и прогноз дрейфа льда в районе моста позволит избежать неприятных последствий сложных метеорологических условий.

Изучение ледового режима в Азовском море и в Керченском проливе было начато еще на рубеже XIX–XX столетий. Первоначально исследования базировались на материалах наблюдений прибрежных станций, позже с судов и с помощью авиаразведки. С конца XX века для решения этой задачи стали привлекаться спутниковые данные (Боровская, 2006; Боровская, Ломакин, 2008), полученные в видимом и инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра. В данной работе представлены результаты комплексных наблюдений с помощью различных сенсоров спутникового базирования, как радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА), позволяющих проводить мониторинг в любых погодных условиях, что особенно важно в зимний период, когда большую часть времени над акваторией пролива наблюдается сплошная облачность, так и сенсоров, предоставляющих информацию в видимом диапазоне с высоким пространственным разрешением. Использование многоспектрального подхода позволяет не только надежно выявлять области, по-

крытые льдом, определять тип льда, но и проводить оценки площадей ледового покрова с большой точностью. В частности, определять районы заторов и зон между конструкциями Крымского моста, через которые происходит распространение льда в южную часть пролива.

Используемые данные

Ретроспективный анализ ледовой обстановки в Керченском проливе был проведен для зимне-весеннего периода (с декабря по март) 1999–2017 гг. Он основывался на следующих спутниковых данных.

Радиолокационные изображения (РЛИ).

- ERS-2 SAR (с декабря 1999 г. по февраль 2011 г.);
- Envisat ASAR (с января 2003 г. по 8 апреля 2012 г.);
- Sentinel-1A SAR-C (с декабря 2014 г. по настоящее время);
- Sentinel-1B SAR-C (с декабря 2016 г. по настоящее время).

Данные видимого и ИК-диапазонов

- Envisat MERIS (с января 2003 г. по 8 апреля 2012 г.);
- MODIS Terra/Aqua (с января 2000 г. по настоящее время);
- Landsat-5 TM (с декабря 1999 г. по апрель 2011 г.);
- Landsat-7 ETM+ (с декабря 1999 г. по настоящее время);
- Landsat-8 OLI/TIRS (с декабря 2013 г. по настоящее время);
- Sentinel-2 A MSI (с декабря 2015 г. по настоящее время).

Для проведения анализа спутниковых данных использовались возможности и инструментарий информационного спутникового сервиса «See the Sea», разработанного в Институте космических исследований РАН (Лупян и др., 2012, 2015).

В качестве метеорологических параметров использовались температура воздуха, скорость и направление ветра, которые отбирались из архивных данных метеостанций, расположенных в Керчи и в Тамани. Для оценки оперативной обстановки в январе–феврале 2017 г. использовались данные метеоресурса <http://earth.nullschool.net>. Результаты анализа ледовой обстановки, полученные нами по спутниковым данным, сравнивались с ретроспективной информацией, доступной на сайте ЕСИМО (<http://193.7.160.230/web/esimo/azov/ice>). Представленные на данном ресурсе карты и описания к ним базируются на информации Гидрометцентра России с прибрежных метеостанций и спутниковых данных, обрабатываемых в НИЦ «Планета». Однако имеющиеся на сайте ЕСИМО в открытом доступе карты ледовых условий в Азовском море и в Керченском проливе (без его южной части) охватывают период, начиная с зимнего сезона 2007–2008 гг., к тому же они обновляются только раз в неделю. Учитывая, что ледяной покров в Керченском проливе может существовать в течение достаточно короткого промежутка времени, часто менее недели, то такая информация может не всегда верно отражать ледовую обстановку в проливе.

Ледовая обстановка в Керченском проливе в 1999–2016 гг.

Проведенный анализ спутниковых данных совместно с данными метеопараметров позволил получить следующую информацию о ледовых условиях в Керченском проливе в 1999–2016 гг.

В течение зимнего периода 1999–2000 гг. на спутниковых изображениях не было выявлено проявлений ледяного покрова, хотя практически весь январь температура воздуха была отрицательной и дул ветер северных румбов. Возможно, это объясняется кратковременным периодом наличия льда, несовпадающим с наличием информативных спутниковых данных.

В зимний период 2000–2001 гг. краткое временное понижение температуры воздуха до $-3\dots-7^{\circ}\text{C}$ при слабом северо-западном ветре наблюдалось в двадцатых числах декабря, что не привело к образованию льда собственно в проливе. В условиях более теплой погоды (отрицательные температуры колебались около -2°C), но при сильном, до 11 м/с, восточном и северо-восточном ветре ледовый покров был выявлен практически во всем проливе. Максимальное распространение льда на юг было зафиксировано 24 января 2001 г. вдоль обоих берегов пролива.

Несмотря на то, что сезон 2001–2002 гг. относится к мягким зимам (Боровская, 2006), отрицательные температуры воздуха зафиксированы на метеостанции г. Керчь уже 5 декабря, и они держались до 17 января 2002 г., доходя до $-12\dots-15^{\circ}\text{C}$ с кратковременными переходами в плюсовую температуру. Наибольшая площадь ледового покрова была выявлена на изображении ERS-2 SAR от 21 января 2002 г., когда южная кромка сплоченного льда проходила в районе о. Тузла, дрейфующий лед распространялся между островом и западным берегом пролива, а отдельные ледяные образования наблюдались вдоль всего западного берега вплоть до Черного моря (*рис. 2*). Хотелось бы обратить внимание на распространение льда у восточного края о. Тузла и его отсутствие северо-восточнее этого края. Характерное пятно чистой воды, которое отмечено стрелкой на *рис. 2*, присутствовало на всех спутниковых изображениях, полученных до 2017 г. Возможно, что лед не образовывался из-за сильных течений в узком проливе между островом и песчаной косой, на месте которой в 2003 г. была построена Тузлинская дамба. На спутниковых изображениях февраля 2017 г., представленных ниже, данная область чистой воды больше не наблюдается. Этот феномен требует более подробного изучения. Не исключена возможность, что в данном месте (между дамбой и островом) характер течений изменился из-за строительства моста.

Зима 2002–2003 гг. относится к наиболее холодным зимам 2000-х годов. Отрицательные температуры установились уже 1–2 декабря 2002 г. и с небольшими перерывами продолжались до конца февраля. Отсутствие информативных спутниковых данных за первую половину декабря не позволило определить время становления ледяного покрова в проливе, но согласно данным ETM+ Landsat-7 от 19 декабря 2002 г. можно утверждать, что ледяной покров наблюдался вдоль восточной части пролива вплоть до о. Тузла. Начиная

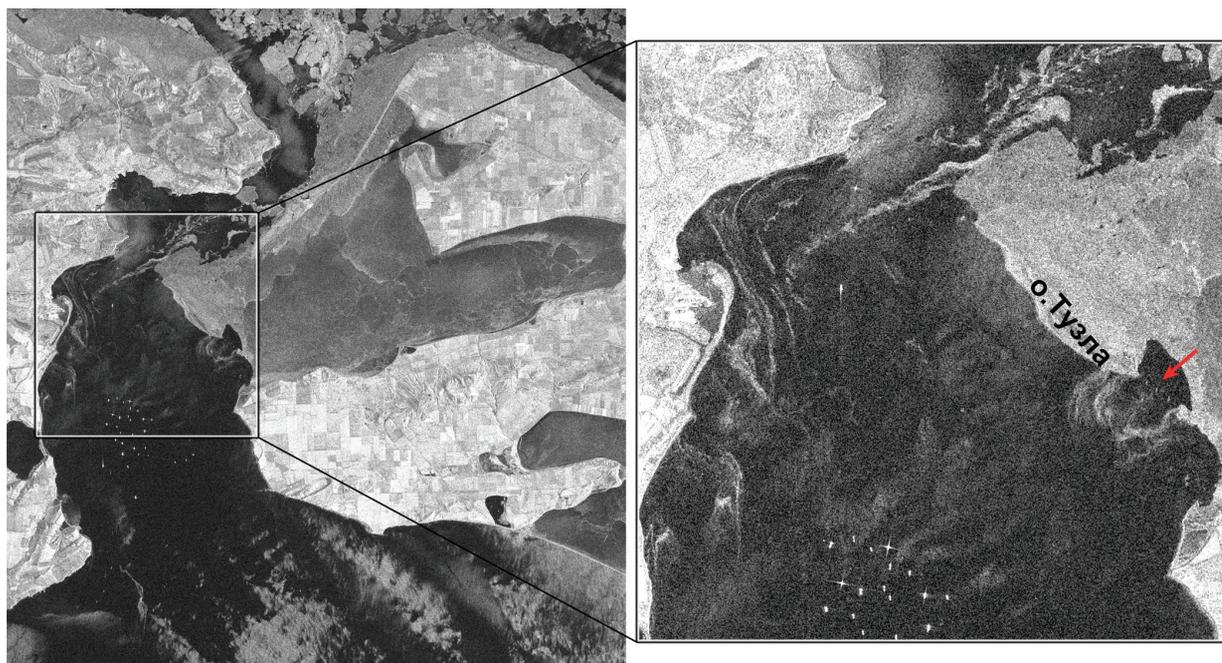


Рис. 2. Проявление ледового покрова в Керченском проливе на РЛИ SAR ERS-2 от 21 января 2002 г. (VV-поляризация, пиксельное разрешение 12,5 м). На увеличенном фрагменте (справа) хорошо виден свободный дрейф льда с двух сторон от о. Тузла. Стрелка указывает на область чистой воды

с первых чисел марта, дневная температура не опускалась ниже нуля, однако ветер северных румбов, устойчиво дующий с 9 по 24 марта 2003 г., способствовал распространению льда из Азовского моря по всему Керченскому проливу. На изображении ASAR Envisat от 20 марта отчетливо проявляется ледяной покров, по крайней мере, до южной оконечности косы Чушка. Таким образом, в 2003 г. Керченский пролив был скован льдом в течение практически 4 месяцев с небольшими перерывами.

В зимний сезон 2003–2004 гг. отрицательные температуры были зафиксированы только в феврале, ветер был неустойчивый, практически каждый день менял свое направление. На спутниковых изображениях лед выявлен не был.

Ледовый покров в мягкий зимний сезон 2004–2005 гг. установился в начале февраля в условиях сильного, до 15 м/с, восточного и северо-восточного ветра при понижениях температуры воздуха до -7°C в ночное время. Максимальный ледовый покров был выявлен на радиолокационном изображении ASAR Envisat от 11 февраля 2005 г. Лед распространился до о. Тузла и недавно построенной Тузлинской дамбы.

Несмотря на то, что зима 2005–2006 гг. была наиболее холодной за предыдущие 20 лет (по критерию суммы отрицательных значений среднесуточной температуры воздуха $-353,4^{\circ}\text{C}$), она относится к типу умеренных зим. Отрицательные температуры установились в январе и держались практически весь месяц и первую половину февраля. Минимальная среднесуточная температура была зафиксирована на метеостанции г. Керчь -21°C (при норме $-0,6^{\circ}\text{C}$). Ледовый покров установился 9 января и, как показали многочисленные спутниковые наблюдения, держался как минимум до 18 февраля (данные ASAR Envisat и SAR ERS-2). На *рис. 3* представлен фрагмент цветосинтезированного изображения

ETM+ Landsat-7 от 28 января 2006 г. Отчетливо виден сплоченный лед в Керченском заливе, у северного берега о. Тузла, и вдоль западного берега Керченского пролива. В северной части пролива сплоченность льда разная, происходит дрейф льда из Азовского моря на юг под действием северо-западного ветра.

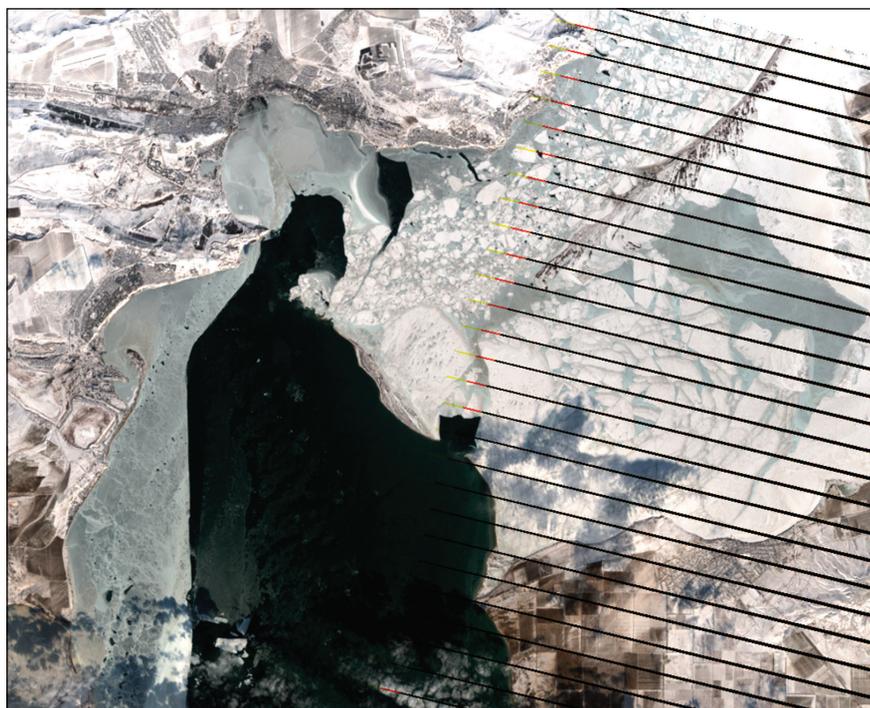


Рис. 3. Проявление ледового покрова в Керченском проливе на цветосинтезированном изображении ETM+ Landsat-7 от 28 января 2006 г. (пиксельное разрешение 30 м)

Ледовая обстановка на 18 февраля 2006 г. представлена фрагментом РЛИ ASAR Envisat (рис. 4). Лед по-прежнему сохраняется вплоть до о. Тузла и Тузлинской дамбы, но уже отсутствует у западного берега пролива. Хорошо видны в виде ярких белых линий ледокольные проводки вдоль судоходной трассы в Азовское море и паромной переправы между портами Кавказ и Крым.

В мягкую зиму 2006–2007 гг. отрицательные температуры воздуха были отмечены только с 22 по 27 февраля. На спутниковых изображениях ледяной покров в проливе не обнаружен.

Начиная с 2008 г. результаты наших спутниковых наблюдений сравнивались с картами ледовой обстановки, представленными на сайте ЕСИМО.

Зима 2007–2008 гг. в районе Керченского пролива относилась к умеренному типу с резкими изменениями погодных условий (Федоренко, 2009). Наблюдались две волны холода, которые определяли два основных периода формирования ледового покрова: с конца декабря 2007 г. по 19 января 2008 г. и с 8 по 19 февраля 2008 г. В промежутке между ними южный и юго-западный ветер был связан с прохождением южных циклонов, способствующих кратковременному повышению температуры воздуха. Ледовый покров сохранялся только в заливах, в виде припая у побережья и у о. Тузла и Тузлинской дамбы, а также

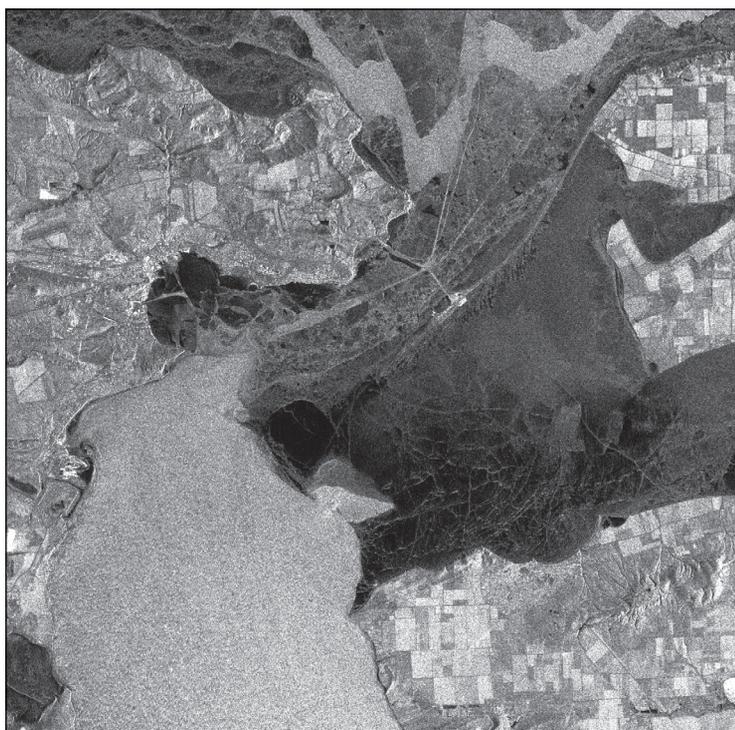


Рис. 4. Проявление ледового покрова в Керченском проливе на РЛИ ASAR Envisat от 18 февраля 2006 г. (VV-поляризация, пиксельное разрешение 12,5 м)

в виде дрейфующего на север льда. Максимальный ледовый покров был выявлен на спутниковых данных от 16 января (ASAR Envisat) и от 19 февраля (ETM+ Landsat-7).

Зимой 2008–2009 гг. существенного образования льда в проливе выявлено не было, за исключением акваторий заливов. Лед образовался достаточно рано, что видно уже на РЛИ SAR ERS-2 от 3 января и ETM+ Landsat-7 от 4 января 2009 г., но он быстро растаял в течение всего сезона практически больше не образовывался. Это объясняется преобладанием циклонической деятельности в атмосфере, влияние антициклонов было кратковременным.

Образование льда в Керченском проливе зимой 2009–2010 гг. началось только в конце января, что было выявлено как на РЛИ, так и в данных видимого и ИК-диапазонах. Последний раз в сезоне проявления ледового покрова в виде битого льда наблюдались 8 февраля 2010 г. на РЛИ SAR ERS-2 и ASAR Envisat при плюсовой температуре и восточном ветре. Южная граница льда проходила по линии о. Тузла – дамба и в виде припая вдоль западного берега пролива.

В сезон 2010–2011 гг. вторжение холодных арктических масс наблюдалось только в третьей декаде января, что привело к позднему формированию ледового покрова. Однако проявления льда в северной части пролива были выявлены и в первой декаде марта, например на изображении TM Landsat-5 от 7 марта 2011 г.

Зима 2011–2012 гг. относится к умеренным зимам. Морозы, по данным метеостанции г. Керчь, начались только 25 января и продолжались до 20 февраля, минимальная температура -19°C была отмечена 2 февраля. Ветер был преимущественно северо-восточных румбов, в начале февраля порывы ветра достигали 20 м/с. Ледовый покров установился

с 29 января, максимальных размеров он достиг к середине февраля. На РЛИ ASAR Envisat от 10 и 16 февраля 2012 г. видно, что дрейфующие льдины достигали даже черноморского предпроливья. В феврале 2012 г. распространение южной границы ледового покрова было наибольшим за все время наблюдений с 2000 г. Вторая волна холода наблюдалась в марте, ледяной покров держался до 17 марта (данные ETM+ Landsat-7), что впервые было отмечено в XXI веке.

В связи окончанием миссии Envisat в апреле 2012 г. мониторинг ледовой обстановки в Керченском проливе в 2013–2014 гг. проводился только по спутниковым данным оптического диапазона.

Зима 2012–2013 гг. была очень теплой, температура воздуха, за исключением коротких трехдневных периодов в начале января, не опускалась ниже нуля, ледовый покров в проливе не образовывался.

В зимний период 2013–2014 гг. наблюдались две волны холода: в середине декабря 2013 г., когда температура воздуха опускалась ниже нуля градусов в течение 4 дней, и с 13 января по 11 февраля 2014 г. В первый период отрицательных температур на изображениях видимого диапазона (например, OLI Landsat-8 от 25 декабря 2013 г.) лед был выявлен только в Динском заливе (восточнее косы Чушка). Во время второй волны холода, когда температура воздуха ниже -10°C держалась с 30 января по 3 февраля (минимум $-15,4^{\circ}\text{C}$ пришелся на 31 января), а скорость северо-восточного, восточно-северо-восточного ветра достигала в порывах 19 м/с, ледяной покров был самым обширным за период наблюдений с 2000 по 2017 года. (Лупян и др., 2017). На *рис. 5* представлен фрагмент цветосинтезированного изображения ETM+ Landsat от 3 февраля 2014 г. Площадь ледяного покрова в собственно проливе, не считая акватории Таманского залива, составила более 290 км². Следует заметить, что если в северной части Керченского пролива преобладали начальные виды льда и нилас, а также дрейфующий лед из Азовского моря, то в юго-западной части пролива преобладал сплоченный (вблизи побережья) и дрейфующий лед. При этом лед свободно дрейфовал на юг по акватории западнее о. Тузла, где в настоящее время идет строительство Крымского моста.

Зимой 2014–2015 гг. и 2015–2016 гг. отрицательных температур воздуха практически не было, за исключением коротких периодов в январе и в феврале. Незначительный припай наблюдался вдоль косы Чушка и в Таманском заливе.

Обобщая результаты спутниковых наблюдений ледовой обстановки в Керченском проливе за период 2000–2016 гг., можно сделать следующие выводы.

Для 2000-х гг. стали характерны более частые (относительно периода с 1950-х гг.) холодные зимы в Азовском море и, соответственно, в проливе (Гришин, 2012). Самыми холодными зимами в 2000-е гг. были зимы 2002–2003, 2005–2006, 2007–2008, 2011–2012, 2013–2014 годов. Суровых зим, т.е. зим с суммой среднесуточных отрицательных температур за сезон более 400°C , не было. Становление льда происходило в более поздний период, в основном в конце января – начале февраля. В 2012 г. лед держался до середины марта. Образование ледового покрова в проливе при понижении температуры воздуха и сильным

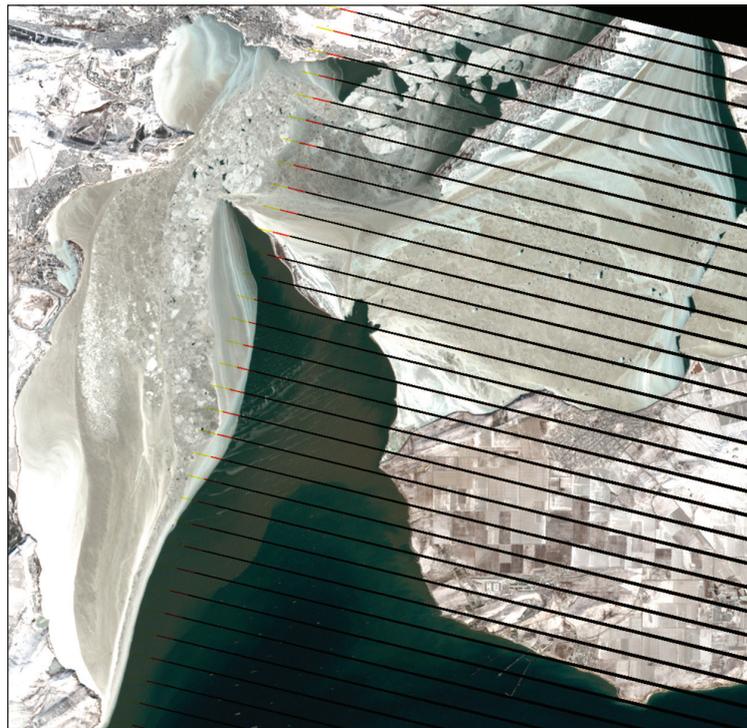


Рис. 5. Свободный дрейф льда в западной части Керченского пролива. Цветосинтезированное изображение ETM+ Landsat-7 от 3 февраля 2014 г.

ветре северо-восточного и восточного направлений происходит очень быстро, при проникновении южных циклонов лед в собственно проливе (не в заливах) также быстро тает. Как правило, за зиму наблюдается несколько волн холода, каждая из которых может привести к образованию ледового покрова.

До строительства Крымского моста в холодные зимы лед свободно дрейфовал на юг западнее о. Тузла. Возведенная в 2003 г. Тузлинская дамба изменила характер циркуляционных процессов в проливе, течение между о. Тузла и дамбой усилилось, и оно направлено, как правило, на север. В данном районе, как видно на спутниковых изображениях, лед практически не образовывался.

Ниже остановимся более подробно на результатах спутникового мониторинга в зимний период 2016–2017 гг., которые свидетельствуют об изменениях ледового режима Керченского пролива, произошедших в результате строительства Крымского моста.

Ледовая обстановка в районе строительства Крымского моста в январе–феврале 2017 г.

Похолодание в регионе Азовского моря с 25 января по 1 февраля 2017 г. сопровождалось понижением температуры воздуха в районе Керченского пролива с положительных значений до $-5...-11^{\circ}\text{C}$ и ветрами северных румбов со скоростями 5–10 м/с. Это привело к резкому понижению температуры моря и образованию первого льда. На РЛИ SAR-C Sentinel-1A от 30 января 2017 г. (рис. 6а) хорошо прослеживаются ледовые поля севернее

о. Тузла и Тузлинской дамбы, а также области припая вдоль юго-западного берега пролива. В момент проведения радиолокационной съемки в проливе наблюдался северо-восточный ветер (55°) со скоростью 11 м/с, температура воздуха составляла -8°C (рис. 6б).

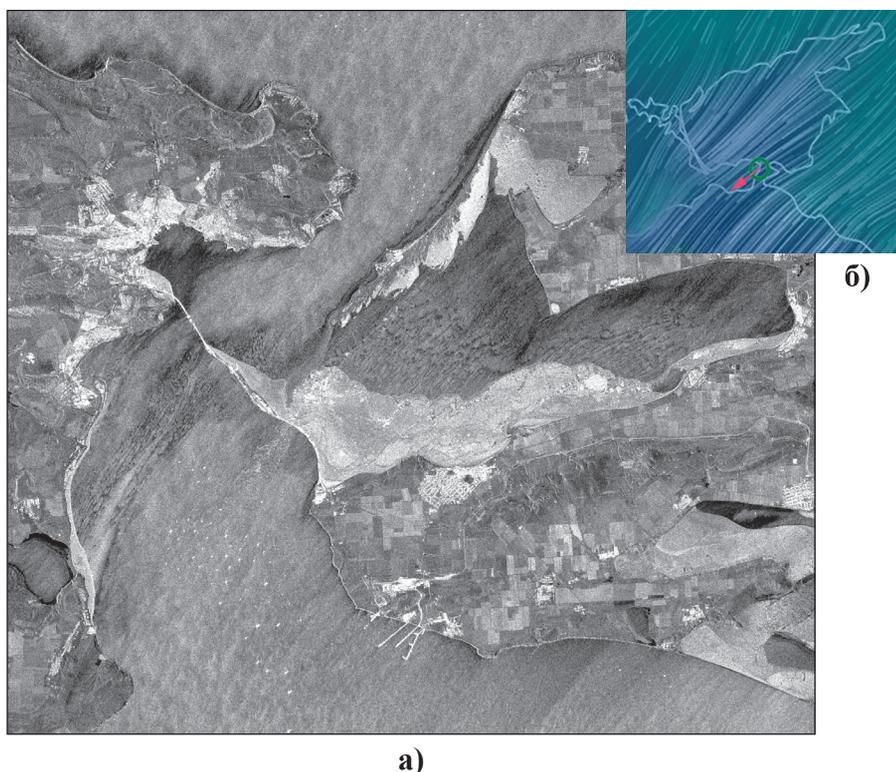


Рис. 6. а) Фрагмент РЛИ SAR-C Sentinel-1A от 30 января 2017 г., 15:27 UTC; б) Поля ветра и температуры приземного воздуха в регионе Азовского моря 30 января 2017 г., 15:00 UTC. Значения метеопараметров в Керченском проливе (зеленый круг): ветер СВ (55°), 11 м/с – направление ветра отмечено стрелочкой, $T = -8^\circ\text{C}$ (<http://earth.nullschool.net>)

Между дамбой и о. Тузла, где построены уже конструкции моста, никакой области чистой воды не наблюдается, лед в этом месте «просачивается» между опорами и дрейфует на юго-запад.

2–3 февраля 2017 г. южный циклон принес теплую погоду, воздух прогрелся до $+9^\circ\text{C}$, и, как показали спутниковые наблюдения, практически весь Керченский пролив, за исключением западной части Таманского залива, очистился ото льда. Иллюстрацией может служить представленный на рис. 7а фрагмент РЛИ Sentinel-1В от 5 февраля 2017 г. На момент проведения радиолокационной съемки в Керченском проливе при температуре воздуха $+9,2^\circ\text{C}$ преобладал юго–юго-западный (210°) ветер со скоростью 7,2 м/с. (рис. 7б).

Видно, что в проливе преобладает чистая вода и только в северной части Таманского залива наблюдается сплоченный нилас (рис. 7а). Следует отметить, что РЛИ выявляет также и картину интенсивного судоходства в Керченском проливе. Яркие белые точки, являющиеся радиолокационными образами судов, прорисовывают основную судоходную трассу, проходящую через «фарватерный» разрыв моста шириной 227 м, который также отчетливо виден на РЛИ.

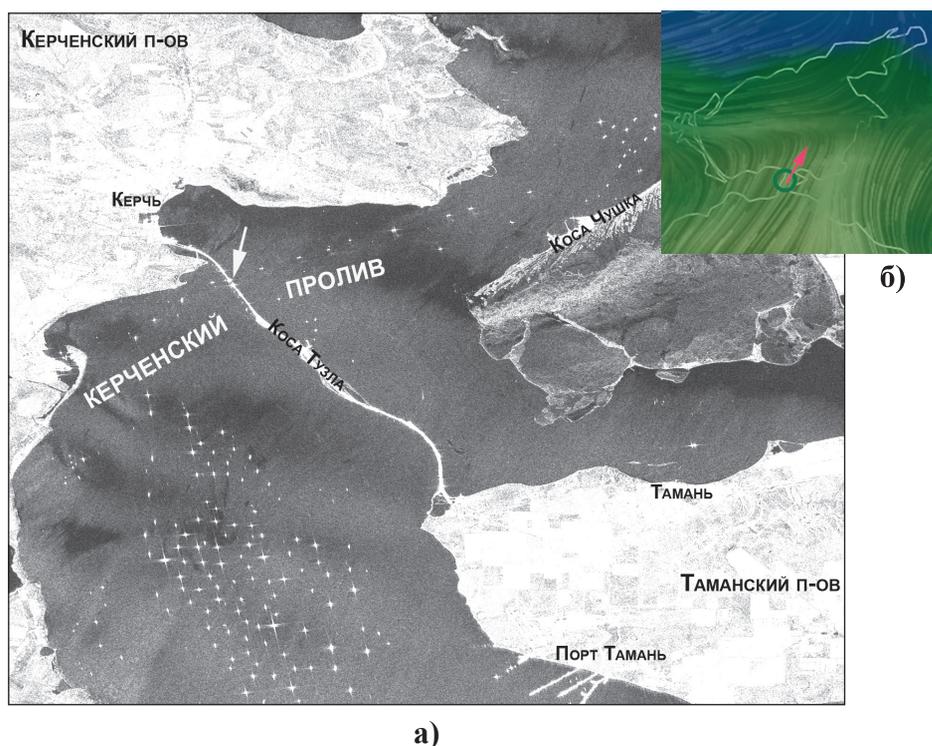


Рис. 7. а) Фрагмент РЛИ SAR Sentinel-1В от 5 февраля 2017 г., 15:26 UTC. Белая стрелочка указывает положение фарватерного разрыва; б) Поля ветра и температуры приземного воздуха в регионе Азовского моря 5 февраля 2017 г., 15:00 UTC (<http://earth.nullschool.net>). Направление ветра отмечено стрелочкой

Однако в течение следующей недели ситуация изменилась радикальным образом. Вторая волна холода, которая продолжалась с 7 по 16 февраля 2017 г., характеризовалась температурой воздуха $-3 \dots -6^{\circ}\text{C}$ и ветрами северных румбов $5\text{--}13$ м/с. Признаки вторичного появления льда в проливе были выявлены по данным спектрорадиометра MODIS, полученным 9 февраля 2017 г. в относительно малооблачных условиях. За следующие несколько суток практически вся северная часть Керченского пролива оказалась покрытой льдом. На рис. 8, 9 приведены фрагменты спутниковых изображений, полученных над акваторией Керченского пролива с помощью ETM+ Landsat-7 и SAR-C Sentinel-1A 11 февраля 2017 г. с интервалом в семь часов. Во время проведения спутниковых съёмок в проливе наблюдался северо-восточный ветер со скоростью $9\text{--}10$ м/с (см. рис. 8б, 9б).

На цветосинтезированном изображении видно, что северная часть Керченского пролива занята дрейфующим льдом, лишь узкая зона чистой воды наблюдается вблизи западного берега пролива. Сплочённость льда в северной части пролива возрастает по мере приближения к о. Тузла и мосту через пролив. Южнее о. Тузла и моста преобладает чистая вода, вблизи берега наблюдается припайный лёд. Усиление сплочённости льда к северу от моста и отсутствие льда к югу от него могут указывать на наличие негативного эффекта «плотины», роль которой в настоящее время фактически исполняет строящийся мост (Лупян и др., 2017). Наличие этой «плотины» затрудняет прохождение льда между опорами технологического и основного моста, и лёд начинает своей массой давить на мостовые опоры. Особое внимание привлекают две зоны «просачивания» льда к югу, отмеченные стрелочками на рисунках. Следует отметить, что через достаточно широкий судоходный

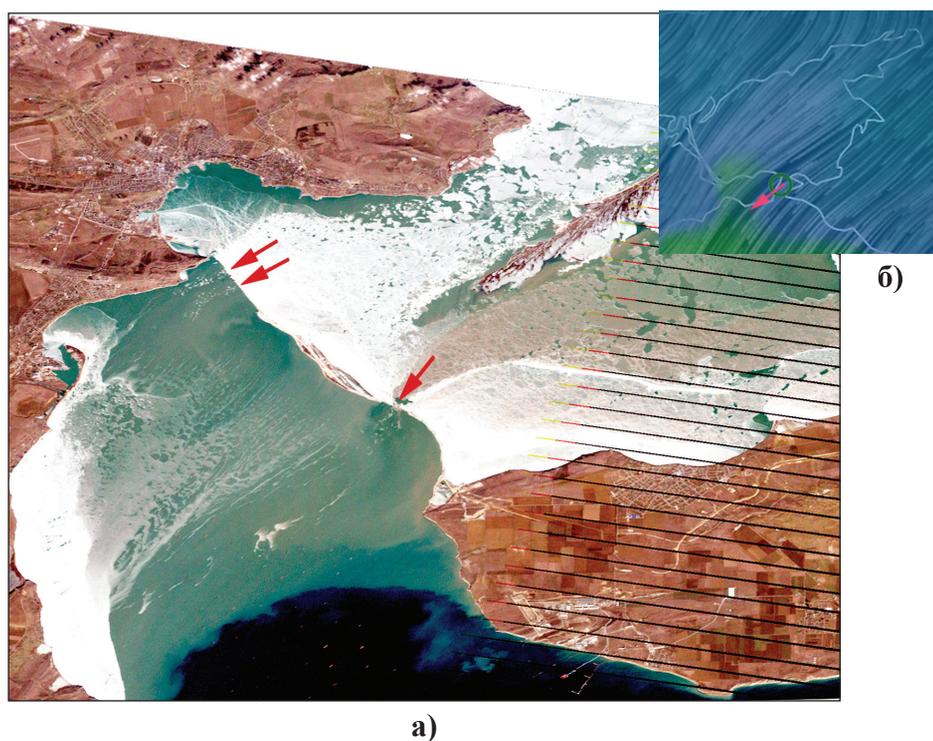


Рис. 8. Фрагмент изображения, цветосинтезированного по данным ETM+ Landsat-7 от 11 февраля 2017 г., 08:21 UTC. Стрелки указывают области «просачивания» льда в южную часть пролива; б) Поля ветра и температуры приземного воздуха в регионе Азовского моря 11 февраля 2017 г., 09:00 UTC. Значения метеопараметров в Керченском проливе (зеленый круг): ветер СВ (50°), 9,4 м/с – направление ветра отмечено стрелочкой, $T = -0,6^{\circ}\text{C}$ (<http://earth.nullschool.net>)

проход моста выносятся существенно меньшее количество льда по сравнению с «просачиванием» льда слева и справа от фарватера, а также по сравнению с «просачиванием» льда в юго-восточной части конструкции на участке между дамбой и косой Тузла. В южной части снимка отчётливо просматривается граница между поступающими в пролив водами Азовского моря и черноморскими водами.

Языки «просачивания» льда к северу от судоходного прохода и в юго-восточной части конструкции отчётливо заметны на РЛИ, приведённом на рис. 3а. Их площадь, определённая по спутниковым данным, составляет 0,25 и 9,1 кв. км соответственно. На РЛИ также видно, что в южной части пролива скопилось большое количество судов, направляющихся в порты Азовского моря и ожидающих ледокола, который осуществляет проводку.

К 13 февраля 2017 г. под продолжительным воздействием ветра северо-восточного направления ледовая обстановка осложнилась, и ледяной покров Керченского пролива достиг своего максимума. На рис. 10а приведён фрагмент изображения, цветосинтезированного по данным сенсора оптического диапазона MSI ИСЗ Sentinel-2А, полученным 13 февраля 2017 г., метеоусловия на момент проведения съемки отражены на рис 10б. На севере Керченского пролива (севернее о. Тузла и моста) выделяется сильно сплочённый лёд, в то время как к югу от моста преобладает чистая вода. Граница, разделяющая Азовоморские и Черноморские воды, сдвинулась к югу, однако просачивания льда к югу от моста уже не наблюдается. На поверхности сплочённого льда выделяются яркие прямые линии, визуализирующие судовые трассы. Согласно данным службы системы управления движения

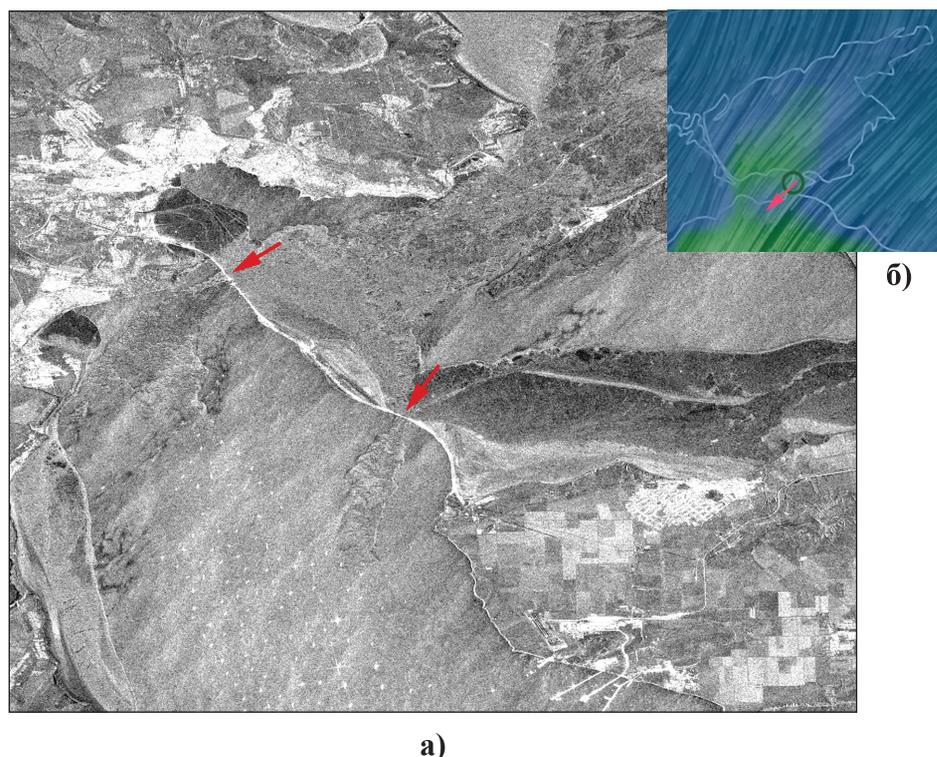


Рис. 9. а) Фрагмент РЛИ SAR Sentinel-1A от 11 февраля 2017 г., 15:27 UTC. Стрелки указывают области «просачивания» льда в южную часть пролива; б) Поля ветра и температуры приземного воздуха в регионе Азовского моря 11 февраля 2017 г., 15:00 UTC. Значения метеопараметров в Керченском проливе (зеленый круг): ветер СВ (45°), 10,0 м/с – направление ветра отмечено стрелочкой, $T = +1,1^{\circ}\text{C}$ (<http://earth.nullschool.net>)

судов (СУДС) Керченского пролива (http://www.rosmorport.ru/nvr_serv_nav.html), в проливе функционируют два парома, имеющих ледовый класс, кроме того, проводку судов в Азовское море осуществляют четыре ледокола.

Спутниковые данные, полученные 16 февраля (рис. 11а), показали, что поле сплочённого льда в северной части пролива отступило к северу от моста и о. Тузла и его площадь уменьшилась. Приведённые на рис. 12 графики изменения основных метеопараметров в Керченском проливе в период с 13 по 16 февраля 2017 г. свидетельствуют о том, что основная причина отступления льда – это изменение направления ветра, произошедшее 14 февраля, и связанное с этим потепление. Приход теплой воздушной массы сопровождался сильным ветром скоростью до 12,5 м/с, что также способствовало разрушению ледяного покрова и его сносу на восток в Керченском проливе.

Таким образом, спутниковые данные, полученные в феврале 2017 г., свидетельствуют о том, что строительство Крымского моста оказывает существенное влияние на динамику ледяного покрова и режим распространения льда в проливе.

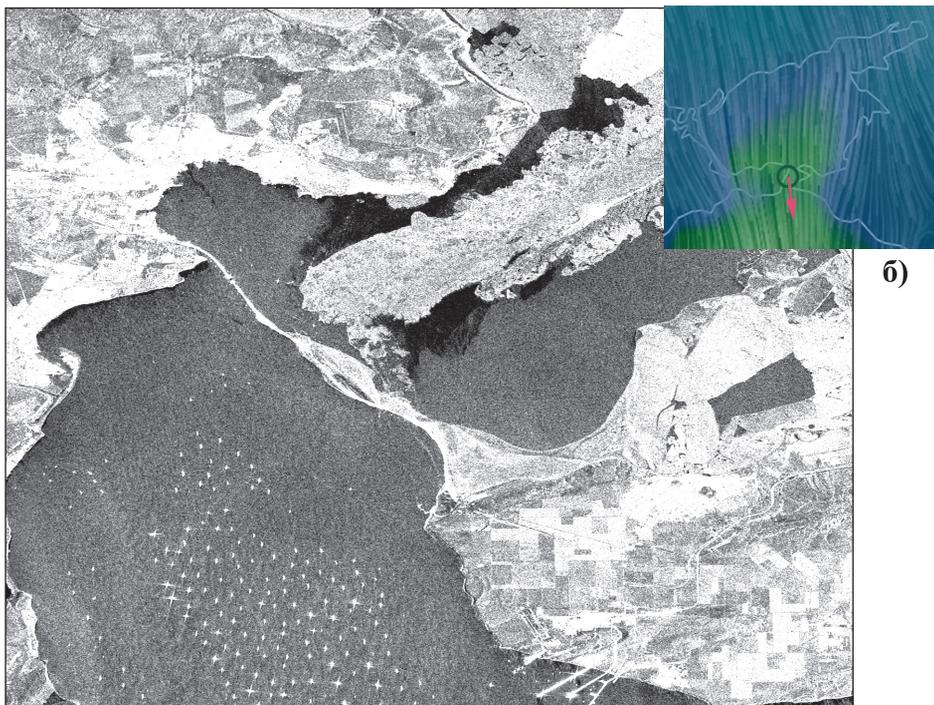
Согласно данным натурных наблюдений и модельным расчётам о зависимости эволюции и сплочённости льда в Азовском море и Керченском проливе от направления и продолжительности действия ветра, опубликованным в научной печати, лёд, выносимый из Азовского моря под действием умеренных и даже слабых СВ ветров, может преодолеть всю длину Керченского пролива и даже выйти в Черное море (Крындин, 1964; Еремеев и др., 2003; Букатов и др., 2012).



а)

б)

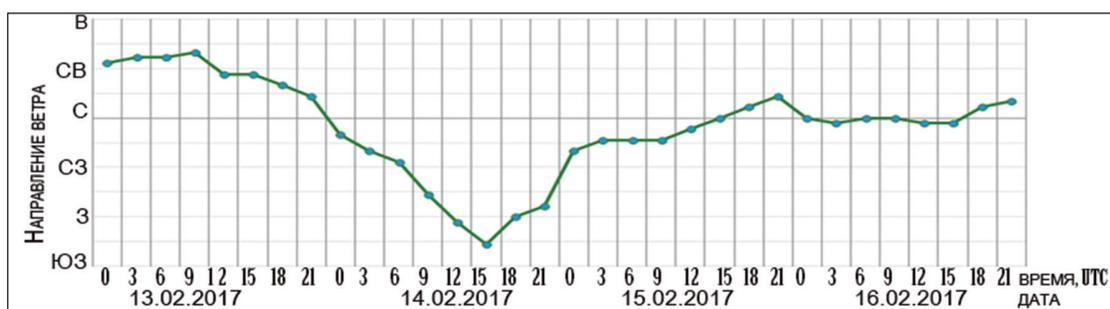
Рис. 10. а) Фрагмент изображения, цветосинтезированного по данным MSI Sentinel-2A от 13 февраля 2017 г., 08:30 UTC; б) Поля ветра и температуры приземного воздуха в регионе Азовского моря 13 февраля 2017 г., 09:00 UTC. Значения метеопараметров в Керченском проливе (зеленый круг): ветер ВСВ (60°), 6,4 м/с – направление ветра отмечено стрелочкой, $T = +0,1^{\circ}\text{C}$ (<http://earth.nullschool.net>)



а)

б)

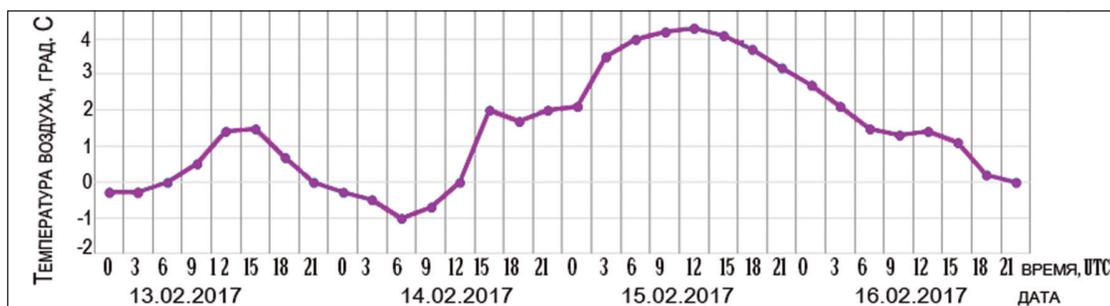
Рис. 11. а) Фрагмент РЛИ SAR Sentinel-1B от 16 февраля 2017 г., 03:39 UTC; б) Поля ветра и температуры приземного воздуха в регионе Азовского моря 16 февраля 2017 г., 03:00 UTC. Значения метеопараметров в Керченском проливе (зеленый круг): ветер С (355°), 11,1 м/с – направление ветра отмечено стрелочкой, $T = +2,1^{\circ}\text{C}$ (<http://earth.nullschool.net>)



а)



б)



в)

Рис. 12. Графики изменения метеопараметров в Керченском проливе с 13 по 16 февраля 2017 г.: а) направление ветра; б) скорость ветра; в) температура воздуха

Заключение

Ретроспективный анализ радиолокационных и оптических спутниковых данных, проведенный с целью оценки ледовой обстановки в Керченском проливе за период 1999–2017 гг., выявил, что для 2000-х гг. стали характерны более частые по сравнению с предыдущими годами холодные зимы, а становление льда в проливе при понижении температуры воздуха и сильном ветре северо-восточного и восточного направлений происходит очень быстро. Причем, как правило, в течение одной зимы наблюдается несколько волн холода, каждая из которых приводит к образованию нового ледового покрова. Особую актуальность задача мониторинга ледовой обстановки приобрела в связи со строительством Крымского моста. Ежедневный спутниковый мониторинг Керченского пролива в январе–феврале 2017 г., включая район строительства Крымского моста, позволил выявить особенности образования и дрейфа ледяного покрова Азовского моря через пролив, а также

его взаимодействие с опорами технологического и основного моста. Было обнаружено, что лед, даже при сильном северо-восточном ветре, не проходит между опорами моста, включая самый широкий судоходный проход. В результате, вероятно, технологический мост представляет собой огромную плотину, которая препятствует естественному дрейфу льда на юг, что вызывает определённые опасения, поскольку лёд не дрейфовал на юг даже через наиболее широкий судоходный участок моста. Неизвестно, сохранится ли этот эффект, когда Крымский мост будет построен, а технологический мост убран, но совершенно очевидно, что теперь потребуется ежегодный спутниковый мониторинг ледовой обстановки в Керченском проливе, возможность проведения которого на сегодняшний день обеспечена современными системами и технологиями (Лаврова и др., 2011).

Неизвестно, насколько учитывался этот эффект при конструировании моста, проводились ли соответствующие численные эксперименты и насколько этот эффект был ожидаем. Однако уже очевидно, что дальнейшее строительство и эксплуатация моста потребует не только ежедневного оперативного спутникового мониторинга ледовой обстановки, но, вероятно, и изменения конструкций опор моста. Например, установку специальных ледорезов, от которых отказались после экспериментальной проверки в Крыловском государственном научном центре, где проводился эксперимент в бассейне со льдом с моделированием условий максимальной ледовой нагрузки на сваи, которая может случиться в худших метеоусловиях раз в 100 лет при ветре до 55 м/с. В более суровые зимы из-за блокирующего эффекта моста возможно образование торосов и стамух (на мелководье), которые могут создавать дополнительные проблемы для Крымского моста.

Обработка и анализ спутниковой информации выполнялись О.Ю. Лавровой и М.И. Митягиной при финансовой поддержке Российского научного фонда в рамках работ по гранту № 14-17-00555. А.Г. Костяной занимался сбором и анализом сопутствующей гидрометеорологической информации в рамках и за счет гранта Российского научного фонда № 14-50-00095. Для проведения анализа спутниковых данных использованы возможности спутникового сервиса «See the Sea», усовершенствование которого осуществляется в ИКИ РАН при поддержке ФАНО (тема «Мониторинг», госрегистрация № 01.20.0.2.00164).

Литература

1. *Боровская Р.В.* Особенности ледового режима Керченского пролива за последние 15 лет по данным спутниковых наблюдений // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон и комплексные исследования ресурсов шельфа. Севастополь: ЭКОСИ-Гидрофизика, 2006. Вып. 14. С. 245–252.
2. *Боровская Р.В., Ломакин П.Д.* Особенности ледовых условий в Азовском море и Керченском проливе в зимний сезон 2005/06 г. // Метеорология и гидрология. 2008. № 7. С. 67–72.
3. *Букатов А.Е., Завьялов Д.Д., Соломаха Т.А.* Численное моделирование выноса льда из Азовского моря в Керченский пролив // Геоинформатика/Geoinformatika. 2012. № 1. С. 57–62.
4. *Гришин М.Г.* Ледниковые периоды и аномальные зимы на побережье Черного моря // Экологическая безопасность прибрежной и шельфовой зон моря. 2012. Т. 1. № 26. С. 134–146.
5. *Еремеев В.Н., Иванов В.А., Ильин Ю.П.* Океанографические условия и экологические проблемы Керченского пролива // Морской экологический журнал. 2003. Т. 2. № 3. С. 27–40.
6. *Костяной А.Г., Гинзбург А.И., Лебедев С.А., Шеремет Н.А.* Южные моря России // Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. Ред. С.М. Семенов, В.М. Катцов. Москва: ИГКЭ, 2014. С. 644–683.

7. Крындин А.Н. Сезонные и межгодовые изменения ледовитости и положения кромки льда на Черном и Азовском морях в связи с особенностями атмосферной циркуляции // Тр. ГОИН. 1964. Вып. 76. С. 7–79.
8. Лаврова О.Ю., Костяной А.Г., Лебедев С.А., Митягина М.И., Гинзбург А.И., Шеремет Н.А. Комплексный спутниковый мониторинг морей России. Москва: ИКИ РАН, 2011. 470 с.
9. Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Костяной А.Г. Спутниковые методы выявления и мониторинга зон экологического риска морских акваторий. Москва: ИКИ РАН, 2016. 335 с.
10. Луян Е.А., Матвеев А.А., Уваров И.А., Бочарова Т.Ю., Лаврова О.Ю., Митягина М.И. Спутниковый сервис See the Sea – инструмент для изучения процессов и явлений на поверхности океана // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2012. Т. 9. № 2. С. 251–261.
11. Луян Е.А., Лаврова О.Ю., Митягина М.И., Костяной А.Г. Ледовая обстановка в районе строительства Крымского моста в феврале 2017 г. // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 1. С. 247–251.
12. Луян Е.А., Прошин А.А., Буццев М.А., Балаилов И.В., Барталев С.А., Ефремов В.Ю., Кашицкий А.В., Мазуров А.А., Матвеев А.М., Суднева О.А., Сычугов И.Г., Толпин В.А., Уваров И.А. Центр коллективного пользования системами архивации, обработки и анализа спутниковых данных ИКИ РАН для решения задач изучения и мониторинга окружающей среды // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2015. Т. 12. № 5. С. 263–284.
13. Федоренко А.В. Особенности ледового сезона 2007–2008 гг. на Азовском море // Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2009. № 343. С. 79–88.
14. Grinevetskiy S.R., Zonn I.S., Zhiltsov S.S., Kosarev A.N., Kostianoy A.G. The Black Sea Encyclopedia. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York. 2015. 889 pp.

Ice conditions in the Kerch Strait in the current century. A retrospective analysis based on satellite data

O.Yu. Lavrova¹, M.I. Mityagina¹, A.G. Kostianoy^{2,3}

¹Space Research Institute RAS, Moscow 117997, Russia

²P.P. Shirshov Institute of Oceanology RAS, Moscow 117997, Russia

³S.Yu. Witte Moscow University, Moscow 115432, Russia

E-mail: olavrova@iki.rssi.ru

The results of a retrospective analysis of radar and optical satellite data conducted to assess the ice conditions in the Kerch Strait for the period of 1999–2017 are presented in this paper. In the 2000s, the cold winters appeared to be more frequent in comparison to previous years, while ice formation occurred in later periods, mainly in late January - early February, and in certain years, ice was still observed in mid-March, such as in 2012. With decreasing air temperature and strong northeast and east winds, the formation of ice cover in the strait occurred very rapidly, and it melted just as quickly with penetration of southern cyclones. As a rule, several waves of cold were observed during the period of a winter, each resulting in the formation of a new ice cover. We focus on the analysis of ice conditions in January–February 2017 and the influence that the Crimean Bridge constructed across the Kerch Strait has on the propagation of the drifting ice. Prior to the construction, in cold winters the ice drifted freely from the Sea of Azov to the south along the western coast of the strait, but the works have significantly impacted this drift pattern.

Two waves of cold that reached the Sea of Azov in late January and in the first half of February 2017 led to the icing of nearly the entire sea surface, and then to ice cohesion and drift to the south of the sea due to strong north winds. As a result, the Kerch Strait was packed with ice incapable to drift further south to the Black Sea, because the bridge under construction acted as a dam preventing the passage of ice between its supports. Consecutive daily satellite radar and optical images of high spatial resolution obtained in the period from 4 to 17 February 2017 made it possible to trace in detail the interaction of the ice cover of the Sea of Azov and the Crimean Bridge. It is concerning that the ice could not pass under the bridge and the entire ice mass (at north winds of 10–15 m/s and currents of 30–40 cm/s) pressed up against its supports. Whether this effect had been foreseen and numerically modeled at the bridge designing stage or not, it is quite clear that from now on ice conditions in the Kerch Strait should be closely monitored using satellite data.

Keywords: Sea of Azov, Kerch Strait, Crimean Bridge, satellite monitoring, radar images, optical images, ice conditions

Accepted: 18.04.2017

DOI: 10.21046/2070-7401-2017-14-2-148-166

References

1. Borovskaya R.V., Osobennosti ledovogo rezhima Kerchenskogo proliva za poslednie 15 let po dannym sputnikovym nablyudenii (Features of the ice regime of the Kerch Strait over the past 15 years according to satellite observations), *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon i kompleksnye issledovaniya resursov shel'fa*, Sevastopol': EKOSI-Gidrofizika, 2006, Issue 14, pp. 245–252.
2. Borovskaya R.V., Lomakin P.D., Osobennosti ledovykh uslovii v Azovskom more i Kerchenskom prolive v zimnii sezon 2005/06 g. (Features of ice conditions in the Azov Sea and the Kerch Strait during the winter season 2005/06), *Meteorologiya i gidrologiya*, 2008, No. 7, pp. 67–72.
3. Bukatov A.E., Zav'yalov D.D., Solomakha T.A., Chislennoe modelirovanie vynosa l'da iz Azovskogo morya v Kerchenskii proliv Numerical simulation of ice transport from the Azov sea to the Kerch strait, *Geoinformatika*, 2012, No. 1, pp. 57–62.
4. Grishin M.G., Lednikovye periody i anomal'nye zimy na poberezh'e Chernogo morya (Ice ages and anomalous winters on the Black Sea coast), *Ekologicheskaya bezopasnost' pribrezhnoi i shel'fovoi zon morya*, 2012, Vol. 1, No. 26, pp. 134–146.
5. Ereemeev V.N., Ivanov V.A., Ilyin Yu.P., Okeanograficheskie usloviya i ekologicheskie problemy Kerchenskogo proliva (Oceanographic conditions and ecological problems in the Kerch Strait), *Morskoj ekologicheskii zhurnal*, 2003, Vol. 2, No. 3, pp. 27–40.
6. Kostianoy A.G., Ginzburg A.I., Lebedev S.A., Sheremet N.A., Yuzhnye morya Rossii, In: *Vtoroi otsenochnyi doklad Rosgidrometa ob izmeneniyakh klimata i ikh posledstviyakh na territorii Rossiiskoi Federatsii* (Second Assessment Report of Roshydromet on climate change and its consequences on the territory of Russian Federation), eds. S.M. Semenov, V.M. Kattsov, Moscow: Institute of Global Climate and Ecology, 2014, pp. 644–683.
7. Kryndin A.N., Sezonnnye i mezhgodovye izmeneniya ledovitosti i polozheniya kromki l'da na Chernom i Azovskom moryakh v svyazi s osobennostyami atmosfernoj tsirkulyatsii (Seasonal and interannual changes in the ice cover and the position of the ice edge in the Black and Azov Seas due to the peculiarities of atmospheric circulation), *Trudy GOIN*, 1964, Vol. 76, pp. 7–79.
8. Lavrova O.Yu., Kostianoy 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, 470 p.
9. Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Kostianoy A.G., *Sputnikovye metody vyyavleniya i monitoringa zon ekologicheskogo riska morskikh akvatorii* (Satellite methods for detecting and monitoring marine zones of ecological risk), Moscow: IKI RAS, 2016, 335 p.
10. Loupian E.A., Matveev A.A., Uvarov I.A., Bocharova T.Yu., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Sputnikovyi servis See the Sea – instrument dlya izucheniya protsessov i yavlenii na poverkhnosti okeana (Satellite service See the Sea – a tool for investigation of processes and phenomena at the sea surface), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2012, Vol. 9, No. 2, pp. 251–261.
11. Loupian E.A., Lavrova O.Yu., Mityagina M.I., Kostianoy A.G., Ledovaja obstanovka v rajone stroitel'stva Krymskogo mosta v fevrale 2017 g. (Ice conditions in the construction area of the Crimean Bridge in February 2017), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2017, Vol. 14, No. 1, pp. 247–251.
12. Loupian E.A., Proshin A.A., Burtsev M.A., Balashov I.V., Bartalev S.A., Efremov V.Yu., Kashnitskiy A.V., Mazurov A.A., Matveev A.M., Sudneva O.A., Sychugov I.G., Tolpin V.A., Uvarov I.A., Tsentr kollektivnogo pol'zovaniya sistemami arkhivatsii, obrabotki i analiza sputnikovykh dannykh IKI RAN dlya resheniya zadach izucheniya i monitoringa okruzhayushchei sredy (IKI center for collective use of satellite data archiving, processing and analysis systems aimed at solving the problems of environmental study and monitoring), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2015, Vol. 12, No. 5, pp. 263–284.
13. Fedorenko A.V., Osobennosti ledovogo sezona 2007–2008 gg. na Azovskom more (Features of the ice season 2007–2008 on the Azov Sea), *Trudy Gidrometeorologicheskogo nauchno-issledovatel'skogo centra Rossijskoj Federatsii*, 2009, No. 343, pp. 79–88.
14. Grinevetskiy S.R., Zonn I.S., Zhiltsov S.S., Kosarev A.N., Kostianoy A.G., *The Black Sea Encyclopedia*, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2015, 889 p.