

Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу  
окружающей среды  
(Росгидромет)  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ  
«ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОКЕАНОГРАФИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени Н.Н. ЗУБОВА»  
СЕВАСТОПОЛЬСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ  
(СО ФГБУ «ГОИН»)

Н.Н. Дьяков, В.В. Фомин, А.С. Цвечинский, А.Е. Липченко, Д.В. Лукин,  
А.А. Полозок, И.Н. Фомина, Т.Ю. Тимошенко, А.А. Белогудов, О.В. Левицкая

**СОВРЕМЕННЫЕ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ  
ФОРМИРОВАНИЯ ВЕТРО-ВОЛНОВЫХ, ЛЕДОВЫХ И ДРУГИХ  
ОПАСНЫХ ЯВЛЕНИЙ В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ**

Севастополь

2019

УДК 551.465.71

**Современные гидрометеорологические условия формирования ветро-волновых, ледовых и других опасных явлений в Керченском проливе /**

Дьяков Н.Н., Фомин В.В., Цвечинский А.С., Липченко А.Е., Лукин Д.В., Полозок А.А., Фомина И.Н., Тимошенко Т.Ю., Белогудов А.А., Левицкая О.В. Росгидромет, Севастопольское отделение федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова».- Севастополь, 2019.- с. 365, ил. 183, табл. 100, библи. 176.

ISBN 978-966-442-079-9

В монографии отражены основные особенности формирования опасных гидрометеорологических явлений в Керченском проливе. По данным прибрежных и экспедиционных наблюдений, измерений течений на автоматических буйковых станциях, численного моделирования динамики вод в Керченском проливе для разных типов атмосферных воздействий на сетке с высоким пространственным разрешением освещены гидрометеорологические условия формирования ледового и ветро-волнового режимов, других опасных гидрологических и метеорологических явлений в проливе.

Монография предназначена для использования в качестве справочного пособия административными органами, проектными и строительными организациями, предприятиями морского транспорта, рыбного хозяйства, экологического мониторинга, гидрометеорологической и спасательной служб, научно-исследовательскими институтами, а также высшими учебными заведениями соответствующего профиля. Полученные в монографии результаты могут быть использованы для последующего ледового и гидрометеорологического мониторинга в районе Крымского мостового перехода.

**Modern hydrometeorological conditions for the formation of wind-wave, ice and other dangerous phenomena in the Kerch Strait / Dyakov N.N., Fomin V.V., Cvecinsky A.S., Lipchenko A.E., Lukin D.V., Polozok A.A., Fomina I.N., Timoshenko T.Y., Belogudov A.A., Levickaya O.V. Sevastopol Branch of federal state budgetary institution «State Oceanographic Institute of N.N. Zubov». - Sevastopol, 2019.- p. 365, ill. 183, tab. 100, bibl. 176.**

The monograph reflects the main features of the formation of dangerous hydrometeorological phenomena in the Kerch Strait. According to coastal and expeditionary observations, measurements of currents at automatic buoy stations, coastal observations of wind waves, numerical modeling of water dynamics in the Kerch Strait for different types of atmospheric effects on a grid with high spatial resolution, hydrometeorological conditions for the formation of ice and wind-wave regimes, other dangerous hydrological and meteorological phenomena in the strait.

The monograph is intended for use as a reference tool by administrative bodies, design and construction organizations, enterprises of maritime transport, fisheries, environmental monitoring, hydrometeorological and rescue services, research institutes, and also higher educational institutions of the corresponding profile. The results obtained in the monograph can be used for subsequent ice and hydrometeorological monitoring in the area of the Kerch bridge crossing.

**Рецензенты:**

В.А. Сафонов, ведущий научный сотрудник, СО ФГБУ «ГОИН», доктор техн. наук,  
В.Н. Белокопытов, МГИ РАН, доктор геогр. наук

Утверждено к печати Ученым советом СО ФГБУ «ГОИН»

ISBN 978-966-442-079-9

© Севастопольское отделение федерального государственного бюджетного учреждения «Государственный океанографический институт имени Н.Н. Зубова»  
© Н.Н. Дьяков, В.В. Фомин, А.С. Цвечинский, А.Е. Липченко, Д.В. Лукин,  
А.А. Полозок, И.Н. Фомина, Т.Ю. Тимошенко, А.А. Белогудов, О.В. Левицкая

## СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	6
СПИСОК РИСУНКОВ	10
СПИСОК ТАБЛИЦ	21
ПЕРЕЧЕНЬ УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ, СИМВОЛОВ, СОКРАЩЕНИЙ И ТЕРМИНОВ	28
1. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ	30
<i>Дьяков Н.Н., Фомин В.В., Цветинский А.С.</i>	
1.1 Физико-географическое описание Керченского пролива	30
1.2 Гидрологические исследования Керченского пролива	55
1.3 Гидрометеорологическая изученность	60
1.4 Математические модели	71
2. СОВРЕМЕННЫЕ УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ЛЕДОВЫХ УСЛОВИЙ В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ	80
<i>Дьяков Н.Н., Лукин Д.В., Тимошенко Т.Ю., Белогудов А.А</i>	
2.1 Ледовый режим, экстремальные ледовые явления, тороси- стость и дрейф льда	80
2.2 Климатические изменения ледовых условий. Связи ледо- вых характеристик Керченского пролива с индексами ат- мосферной циркуляции Северного Полушария	94
2.3 Ледовый мониторинг при строительстве Крымского мосто- вого перехода	98
3. ДИНАМИКА ВОД КЕРЧЕНСКОГО ПРОЛИВА ПО ДАН- НЫМ НАТУРНЫХ НАБЛЮДЕНИЙ	129
<i>Дьяков Н.Н., Цветинский А.С., Левицкая О.В.</i>	

3.1	Режим волнения (средние и экстремальные характеристики, направление распространения волн). Условия формирования и климатические характеристики волнения	129
3.2	Течения (циркуляция вод, средние и экстремальные характеристики) по данным натурных наблюдений	154
3.2.1	Режим течений в северной узости	158
3.2.2	Максимальные течения в Павловской узости	167
3.2.3	Течения в Тузлинской промоине	174
3.4.4	Режим течений на разрезе м. Такиль – м. Панатия	176
3.3	Уровень моря	181
4.	ДИНАМИКА ВОД В КЕРЧЕНСКОМ ПРОЛИВЕ (ВКЛЮЧАЯ РАЙОН МОСТОВОГО ПЕРЕХОДА) ПО ДАННЫМ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ	
	<i>Фомин В.В., Полозок А.А., Фомина И.Н</i>	194
4.1	Максимальные высоты волн, скорости течений и подъемы уровня моря в характерных точках Керченского пролива для различных скоростей и направлений ветра	195
4.2	Пространственная структура ветро-волновых течений в Керченской бухте	240
4.3	Максимальные высоты волн, скорости течений и подъемы уровня моря в Керченском проливе в период экстремального шторма в ноябре 2007 г.	245
4.4	Статистические характеристики ветрового волнения по данным ретроспективного анализа	248
4.5	Водообмен через Керченский пролив	259

<b>5 ОПАСНЫЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ</b>		
	<i>Липченко А.Е., Цвезинский А.С.</i>	273
5.1	Ветер	274
5.1.1	Скорость ветра	274
5.1.2	Направление ветра	279
5.1.3	Сильные ветры	281
5.1.4	Расчетные значения скорости ветра малой обес- печенности	289
5.1.5	Синоптические условия возникновения сильных штормов в Керченском проливе	290
5.2	Атмосферные осадки	307
5.3	Атмосферные опасные явления	316
5.3.1	Туманы, ухудшение видимости	316
5.3.2	Грозы	324
5.3.3	Смерчи в Керченском проливе	325
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>		328
<b>СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ</b>		344

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Керченский пролив является важной судоходной магистралью, соединяющей Черное и Азовское моря. В настоящее время через пролив сооружен один из самых сложных гидротехнических объектов в истории России – Крымский мостовой переход, который имеет ключевое значение с точки зрения интеграции Крыма в Российскую Федерацию, развития промышленного и рекреационного потенциала полуострова. Создание транспортного перехода осложнялось непростыми условиями в Керченском проливе: сложным геологическим строением (наличием мощного слоя илистых отложений, грязевого вулканизма, сейсмической активности) и опасными гидрометеорологическими условиями.

Актуальность рассмотрения именно опасных природных процессов обусловлена, прежде всего, отрицательным опытом эксплуатации предыдущего мостового перехода, построенного в 1944 г. в северной узости Керченского пролива, без учета ледовых условий; и разрушенного уже в январе следующего года в результате интенсивного дрейфа ледовых полей из Азовского моря. Этот случай и сложная ледовая обстановка, регулярно наблюдающаяся в этой части пролива, вызывала опасения в безопасной эксплуатации транспортного перехода, реализованного конструктивно в виде моста.

Севастопольское отделение ФГБУ «ГОИН» внесло большой вклад в исследование гидрометеорологических условий Керченского пролива, динамики его вод. В отделении работал выдающийся известный исследователь пролива Э.Н. Альтман, его работы по гидрологии Керченского пролива являются классическими и до сих пор не утратили своей актуальности. В 2014 – 2017 гг. Севастопольское отделение совместно с головным институтом выполняли задачи общегосударственного значения по инже-

нерно-гидрометеорологическим изысканиям для технико-экономического обоснования строительства транспортного перехода через Керченский пролив. Сотрудники СО ГОИН принимали активное участие в экспедиционных и камеральных работах в 2014 – 2017 гг., включая участие в проведении специального ледового мониторинга для обеспечения безопасности строительства мостового перехода в ледовые сезоны. Результаты обобщения этих работ, а также данных морских экспедиционных и рейдовых исследований, выполненных в Керченском проливе за последние годы (1986 – 2018 гг.), нашли отражение в настоящей монографии, при этом основное внимание в ней уделено опасным гидрометеорологическим явлениям.

Монография состоит из предисловия, пяти глав и заключения.

В первой главе приводится физико-географическое описание Керченского пролива, представлена общая характеристика исходных материалов, средств и методов их анализа. Здесь же дается анализ гидрометеорологической изученности Керченского пролива, описание численных моделей, используемых при расчете динамики вод в проливе.

Вторая глава монографии содержит информацию о наиболее критичных, с точки зрения строительства и эксплуатации Крымского мостового перехода, ледовых условиях в проливе в умеренные и суровые зимы. В главе приводятся данные статистического анализа характерных показателей ледового режима у берегов Керченского пролива, а также карты многолетнего распределения льда на его акватории. Рассмотрены особенности формирования тяжелых ледовых условий в проливе и связи ледовых характеристик с индексами атмосферной циркуляции Северного полушария. Приводится информация об участии СО ФГБУ «ГОИН» в ледовом мониторинге при строительстве Крымского мостового перехода. Здесь представлены результаты ледового мониторинга в 2016 – 2017 гг.

В третьей главе исследуется динамика вод Керченского пролива по данным натурных наблюдений. Рассматриваются режимные характеристики (средние и экстремальные величины, направление распространения волн), условия формирования и климатические характеристики волнения, а также экстремальные характеристики сгонно-нагонных колебаний уровня моря. В этой главе обобщена информация по измерениям течений на автономных буйковых станциях (АБС), а также экспедиционным и рейдовым работам в проливе. Особое внимание уделено районам Керченского пролива, где происходит усиление течений.

В четвертой главе монографии рассмотрена динамика вод в Керченском проливе (включая район Крымского мостового перехода) по данным численного моделирования. При расчетах использовалась совместная модель ADCIRC+SWAN, объединяющая две хорошо апробированные численные модели – Advanced Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries (ADCIRC) и Simulation Waves Nearshore (SWAN), которые применяются для расчета штормовых нагонов и ветрового волнения. В результате численных экспериментов получены экстремальные значения высот волн, подъемов уровня моря и скоростей течений в 30-ти характерных точках Керченского пролива для типовых полей ветра и для условий экстремального шторма в ноябре 2007 г. Получены статистические характеристики ветрового волнения в Керченском проливе по данным ретроспективного анализа ERA Interim за 1979–2017 гг. В этой главе представлены результаты численного моделирования ветро-волновых течений в Керченской бухте и данные расчета водообмена через северную узость Керченского пролива.

Пятая глава монографии посвящена анализу опасных метеорологических явлений, наблюдавшихся в районе Керченского пролива. Показа-



но, что на безопасность последующей эксплуатации Крымского мостового перехода в проливе кроме гидрологических условий могут оказать существенное влияние и ряд экстремальных метеорологических явлений, таких как штормовой ветер, сильный ливень, снижение видимости вследствие морских туманов и смерчи.

Основные выводы проведенных исследований сформулированы в заключении.

Монография предназначена для использования в качестве справочного пособия административными органами, проектными и строительными организациями, предприятиями морского транспорта, рыбного хозяйства, экологического мониторинга, гидрометеорологической и спасательной служб, научно-исследовательскими институтами, а также высшими учебными заведениями соответствующего профиля. Представленные в монографии результаты исследований, многолетние режимные гидрометеорологические характеристики могут быть использованы для последующего ледового и гидрометеорологического мониторинга в районе Крымского мостового перехода, проектирования гидротехнических сооружений.

Предисловие и заключение подготовлены Дьяковым Н.Н. Глава 1 написана Дьяковым Н.Н., Фоминым В.В. и Цвечинским А.С. Глава 2 подготовлена Дьяковым Н.Н., Лукиным Д.В., Тимошенко Т.Ю. и Белогудовым А.А. Глава 3 написана Дьяковым Н.Н., Цвечинским А.С. и Левицкой О.В., глава 4 – Фоминым В.В., Полозок А.А. и Фоминой И.Н., а глава 5 – Липченко А.Е. и Цвечинским А.С.

В подготовке монографии, помимо авторов, активное участие принимали сотрудники СО ФГБУ «ГОИН» Жилиев Д.А. и Мартынов Е.С., которым авторы выражают искреннюю благодарность.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные положения и результаты исследований, полученные в ходе подготовки данной монографии, могут быть кратко сформулированы следующим образом.

*Гидрометеорологическая изученность, используемые математические модели.* Керченский пролив относится к хорошо изученным акваториям. За более чем столетний период исследований, осуществленных в его прибрежных и открытых районах, накоплен значительный массив наблюдений. Традиционно, после 1945 г., координацией научно-исследовательских работ в районе Керченского пролива занималось Севастопольское отделение Государственного океанографического института.

Информационной основой настоящей работы явился банк океанографической информации Керченского пролива, созданный в СО ФГБУ «ГОИН». Он состоит из четырех блоков: экспедиционных наблюдений, комплекса регулярных прибрежных наблюдений на морских гидрометеорологических станциях и постах, съемок ледового покрова моря дистанционными методами, наблюдений за течениями и водообменном.

Массив экспедиционных и рейдовых наблюдений в Керченском проливе за температурой, соленостью воды, ветровым волнением, ледовыми условиями, метеорологическими и гидрохимическими характеристиками сформирован, преимущественно, на основе архивных данных СО ФГБУ «ГОИН» и включает около 18 тыс. гидрологических станций, выполненных за период 1891 – 2018 гг.

Для изучения ледовых условий открытой части Керченского пролива использовались данные ледовых авиаразведок, данные попутных судовых

наблюдений ледокольного флота и геокодированные изображения ледовой обстановки с искусственных спутников Земли.

Основу банка данных наблюдений за течениями Керченского пролива составляют непрерывные наблюдения на автономных буйковых станциях (АБС) и измерения течений, выполненные во время экспедиционных и рейдовых работ с помощью морских вертушек ВММ. К настоящему времени банк СО ФГБУ «ГОИН» содержит 1081 временную реализацию направлений и скоростей течений, измеренных посредством АБС в Керченском проливе. За период экспедиционных и рейдовых работ (1950 – 2018 гг.) общее количество гидрологических станций, на которых измерялись направления и скорости течений с борта судов с помощью морских вертушек ВММ, составило ~7,0 тысяч.

Для анализа многолетней и сезонной изменчивости, экстремальных гидрометеорологических характеристик в прибрежной зоне Керченского пролива был использован банк данных береговых наблюдений СО ФГБУ «ГОИН», который содержит комплекс гидрометеорологических наблюдений за весь период исследований по 2017 – 2018 гг. включительно.

В настоящем исследовании использовалась совместная численная модель ADCIRC + SWAN, которая объединяет две модели – Advanced Circulation Model for Shelves Coasts and Estuaries (ADCIRC) и Simulation Waves Nearshore (SWAN). Эти модели широко применяются для расчета штормовых нагонов и ветрового волнения соответственно.

Численное моделирование выполнялось для всего Азово-Черноморского бассейна на неструктурированной расчетной сетке из ~158 тыс. узлов. Размер сторон конечных элементов изменялся в пределах от 60 м в Керченском проливе до 4900 м в глубоководной части Черного моря.

Выбор параметров модели основывался на сопоставлении данных численного моделирования колебаний уровня моря в районе МГ Опасное с данными натурных наблюдений. Статистические характеристики модельных и натурных данных для характерных синоптических ситуаций показали неплохую сопоставимость.

*Современные условия формирования ледового режима в Керченском проливе.* Выполненные исследования показали, что ледовые условия в Керченском проливе являются важнейшей гидрометеорологической характеристикой, оказывающей влияние на условия строительства и эксплуатацию гидротехнических сооружений. В целом, Керченский пролив характеризуется неустойчивым ледовым режимом. Пролив непосредственно соединяется с относительно теплым в зимнее время Черным морем и, кроме того, он подвержен воздействию ледовитого Азовского моря. Ветром и течением льды Азовского моря часто выносятся в Керченский пролив, поэтому в проливе наряду со льдом местного происхождения, нередок приносной лед. Количество приносного льда и сроки его появления во многом зависят от того, насколько сильно в данную зиму развит ледовый покров на Азовском море. В случае активизации черноморских течений в проливе, происходит поступление относительно теплой воды, что приводит к процессам таяния и очищения пролива ото льда.

По особенностям ледового режима Керченский пролив условно можно разделить на три части, границей между которыми является коса Тузла: Таманский залив, где ежегодно наблюдается появление льда – самый ледовитый район Керченского пролива; северную часть пролива (включая и Керченскую бухту), ледовый режим которой во многом определяется приносным льдом из Азовского моря; южную часть Керченского

пролива – наименее ледовитый район, где преобладает влияние Черного моря.

Наиболее сложная ледовая обстановка в Керченском проливе, включая и район мостового перехода, может наблюдаться в умеренные и особенно суровые зимы. Повторяемость умеренных зим за период 1924 – 2018 гг. составила 46 % (42 ледовых сезона). Среднегодовые показатели ледовых условий умеренных зим в районе Керченского пролива почти идентичны среднегодовому режиму всех зим. По данным многолетних наблюдений на МГ, авиаразведок и спутникового мониторинга, в среднем, наибольшая сплоченность льда (8 – 9 баллов) в умеренные зимы наблюдается в Таманском заливе, в районе мостового перехода сплоченность в январе-феврале может достигать 6 – 7 баллов. Устойчивый припай в умеренные зимы образуется только в Таманском заливе и северной части пролива; сроком – на один месяц. Толщина льда в Таманском заливе составляет в среднем 28 см при максимальной толщине 60 см (зима 1936/1937 гг.). В остальных частях пролива в умеренные зимы средняя многолетняя толщина льда изменяется от 18 – 20 см в центральных и южных районах, до 24 см – в северной узости. Максимальная толщина льда составляет у Заветного – 28 см, в Керчи и Опасном – 38 и 40 см соответственно.

В суровые зимы ледовая обстановка в Керченском проливе наиболее тяжелая. Всего за период 1924 – 2018 гг. здесь было зафиксировано 14 суровых зим (15% от общего числа всех зимних сезонов). В такие зимы сплоченность льда в районе расположения мостового перехода увеличивается до 7 – 10 баллов. Ледовитость Керченского пролива в последней декаде января – феврале суровых зим в среднем составляет 685 км<sup>2</sup> (т.е. льдами покрыто около 85% акватории). В Азово-Керченском бассейне наиболее

суровой за 100-летний период наблюдений была зима 1953 – 1954 гг. Именно в эту зиму на береговых пунктах Керченского пролива была зафиксирована максимальная за весь период многолетних наблюдений толщина льда: МГ Опасное – 70 см, МГ Тамань – 64 см, МГП Керчь – 44 см. Продолжительность ледового периода составила от 130 (Опасное) до 150 (Керчь) суток, что превысило среднюю продолжительность ледового периода в регионе на 70 (Тамань) – 99 (Керчь) суток.

В результате дрейфа и деформации масс льда в суровые и некоторые умеренные зимы могут образовываться гряды торосов, которые, садясь на мель, превращаются в сплошные ледяные барьеры. Наиболее часто они образуются у входа в Керченский пролив, в районе Павловской узости, Тузлинской промоины, северного побережья косы Остров Тузла. Высота торосов в открытых частях северной части пролива, как правило, не превышает 1 – 2 м; на прибрежных отмелях косы Остров Тузла торосистые нагромождения иногда достигают 5 – 12 м.

Тяжелые ледовые условия в настоящее время в Керченском проливе наблюдаются редко. Последняя суровая зима в Азово-Керченском бассейне была 32 года назад (в 1986-1987 гг.). В последние 40 лет (1977 – 2018 гг.) наибольшую повторяемость (56%) имеют мягкие зимы. В такие зимы большая часть Керченского пролива полностью свободна ото льда на протяжении всего зимнего сезона. На всех пунктах Керченского пролива за весь период ледовых наблюдений в основных ледовых характеристиках выявлены значимые отрицательные линейные тренды. Тенденция уменьшения числа дней со льдом в Керчи за период 1925 – 2016 гг. составила -4,4 суток/10 лет. Продолжительность ледового сезона в этом пункте сокращалась с угловым коэффициентом линейного тренда -6,4 суток/10 лет, а толщина льда уменьшалась на -1,5 см/10 лет.

Результаты исследования статистических связей ледовых характеристик Азовского и Черноморского бассейна с индексами атмосферной циркуляции, характеризующими изменчивость климатических процессов в Атлантико-Европейском регионе, и, соответственно, погодные условия на Черном и Азовском морях в холодный период года, показали, что наибольшие значимые положительные корреляции (0,30 – 0,50) характерны для всех основных ледовых показателей на всех пунктах Азово-Керченского бассейна со Скандинавским колебанием (SCAND), характеризующим барический градиент между Скандинавским полуостровом и югом Европы.

Ледовые условия в Керченском проливе являются важнейшей гидрометеорологической характеристикой, влиявшей на стадии строительства, и в последующем определяющей дальнейшую безопасную эксплуатацию Крымского моста. На период строительства, в ледовые сезоны (2014 – 2018 гг.), сотрудники Севастопольского отделения ГОИН совместно с другими заинтересованными ведомствами (АО «Глоботэк») провели цикл экспедиционных исследований, основными задачами которых был сбор информации о текущей ледовой обстановке в Керченском проливе и прилегающей акватории Азовского моря; передача этой информации в оперативном режиме службе управления ледовой обстановкой при строительстве транспортного перехода через Керченский пролив.

Ледовый мониторинг, проведенный в ледовый сезон 2016 – 2017 гг., показал, что формирование опасных ситуаций и угроз для конструкций моста происходит, как непосредственно в районе строительства транспортного перехода в Керченском проливе, так и в южной части Азовского моря. Под действием ветров северных румбов в период мониторинга наблюдалось быстрое (в течение суток) заполнение акватории пролива дрейфующими льдами из Азовского моря, которое сопровождалось обра-

зованием заторов, торосов и навалов на сваи и конструкции моста. Дальнейшее уплотнение и смерзание дрейфующих льдов вдоль трассы моста при продолжающемся напоре ледовых полей со стороны Азовского моря создавало реальную угрозу для конструкций моста.

Анализ ледовой обстановки в сезон 2016-2017 гг. показал, что конструкции моста задерживают лед, скорость движения которого превышает 0,28 м/с, и способствуют заторам. Это приводит к образованию торосов, стамух, подсовов и навалов льда на сваи и опоры моста. При меньшей скорости дрейфа полей лед проходит между опорами моста беспрепятственно. В целом, даже в условиях мягкой зимы, ледовая обстановка в районе Крымского мостового перехода была непростой.

Конструкции моста смогут задерживать дрейфующий лед, особенно если его толщина составит 30 – 60 см. При интенсивном дрейфе полей на опоры, возможен навал льда высотой 5 – 12 м, что, принимая во внимание илистые грунты на дне пролива, не исключает возможность подвижки и повреждения опор моста. Учитывая вышесказанное, в случаях ледовитых умеренных и суровых зим, необходимо проводить ледовый мониторинг, уделив особое внимание дрейфу льда на опоры моста, торосистости и процессам ледовой экзарации.

*Динамика вод Керченского пролива по данным натурных наблюдений.* По данным береговых станций Керченского пролива установлено, что наиболее интенсивное ветровое волнение наблюдается в холодный период года (октябрь-март). В это время повторяемость сильного волнения ( $\geq 7,5$  дм) составляет 7,6 – 8,8 % в Опасном и 2,7 – 6,4 % в Керчи; а четырехбалльного шторма – от 0,6 до 1,9 % в северной части пролива и от 0,1 до 0,5 % в Керченской бухте. При этом высота волн может достигать 2,0 м.



Особенно сильное волнение в ноябре-марте наблюдается в южной части Керченского пролива (МГП Заветное), где повторяемость волнения 3 балла и более ( $\geq 7,5$  дм) составляет 27,8 – 31,0 % всех случаев наблюдений. Повторяемость штормового волнения 4 балла и более ( $> 12,5$  дм) в эти месяцы составляет 9,2 – 10,4 %, а повторяемость 5 – 6-балльных штормов (высота волн более 2 м) достигает 0,9 % – 2,2 %. В общей сложности, за последние 50 лет, волны высотой 2,0 – 3,5 м наблюдались в Заветном ~ 150 раз, а волны более 3,5 м – 20 раз.

В районе Керченской бухты, по данным МГП Керчь, преобладающими в течение года являются: северное (18,4 %), юго-восточное (16,6 %), западное (15,9 %) и северо-западное (13,2 %) направления волнения. В южной части пролива (Заветное) преобладающими и наиболее волноопасными являются: северо-восточное направление (22,3 %) – с разгонами волн из Таманского залива, северное (16,3 %) – с разгонами вдоль Керченского пролива, восточное (9,2 %) и южное (12,9 %) направление. В сезонных изменениях сильного волнения в районе порта Крым (МГ Опасное) волнение северо-восточного направления преобладает на протяжении всего года. Максимальная повторяемость волнения этих румбов (29,5 – 31,8 %) отмечается в августе-ноябре.

Максимальные значения наблюдаемых высот волн в Опасном и Керчи составили 2,0 м. В районе Заветного волны высотой 5,5 м наблюдались при продолжительном южном ветре силой 17-20 м/с (8 января 1958 г.).

Анализ межгодового волнения на береговых пунктах показал, что в 50 – 70-е годы XX века наблюдалась максимальная волновая активность, после 1980 г. произошел резкий спад волновой активности. Для периода 1993 по 2018 гг. характерно постепенное увеличение среднегодовых высот волн и повторяемости сильного волнения.

Анализ данных измерений течений, полученных на АБС, а также в результате рейдовых и экспедиционных работ с помощью вертушек ВММ, показал, что в узостях Керченского пролива (Павловской и северной, Тузлинской промоине) происходит усиление скоростей течений.

Максимальные величины течений в Северной узости, зарегистрированные АБС, наблюдались преимущественно при действии умеренных и сильных ветров (8 – 16 м/с). При штормовом ветре южных румбов скоростью 10 – 12 м/с наибольших величин (78 – 101 см/с) достигали черноморские течения. Максимальные течения из Азовского моря преобладали при ветрах северных и северо-восточных направлений. Как следует из данных, полученных с помощью вертушек ВММ, наибольшие скорости течений (102 – 110 см/с) наблюдались в поверхностном слое в ноябре и августе в районе паромной переправы порт Крым – порт Кавказ.

Скорости течений в Павловской узости изменяются в широких пределах, от инструментального нуля до 92 см/с, при этом течения стабильны по направлению. Генеральное направление преобладающего переноса вод (суммарные розы течений) во всей толще прибрежной зоны (на горизонтах 1 – 6 м) ориентированы преимущественно в южном, юго-западном (азовские течения), реже в северном, северо-восточном направлениях (черноморские течения). Измеренные максимальные величины течений на АБС в Павловской узости составили 52 – 92 см/с. Более устойчивы (имели большую повторяемость) и достигали максимальных скоростей чаще течения из Азовского моря. Они наблюдались при действии умеренных и штормовых ветров скоростью 5 – 12 м/с северных, северо-восточных и северо-западных направлений. Максимальная скорость азовского течения (92 см/с) была измерена 05.06.1979 г. Учитывая сужение Павловской узости в последнее время до 3,3 км, здесь следует ожидать усиления течений

и возможного размыва донных грунтов вблизи опор моста, что требует проведения постоянного мониторинга течений в этой узости.

Как показал выполненный статистический анализ, течения в южной части Керченского пролива (разрез м. Такиль – м. Панагия) могут быть достаточно интенсивными. Средние скорости всех измеренных течений изменялись от 13 – 18 см/с до 28 – 41 см/с. Максимальных скоростей (65 – 101 см/с) по данным АБС достигали течения из Черного моря (в 8 реализациях). Абсолютная максимальная скорость течений на разрезе м. Такиль – м. Панагия – 101 см/с, была измерена 02 октября 1969 г. в придонном слое недалеко от м. Такиль.

Проведенные исследования показали, что амплитуды сгонно-нагонных колебаний в Керченском проливе могут быть довольно значительными, хотя и существенно меньше, чем в Таганрогском заливе и Азовском море. За весь период наблюдений максимальная величина подъема уровня от среднемноголетнего значения составила в Опасном – 107 см, в Тамани – 65 см, в Керчи – 58 см и в Заветном – 55 см. Минимальная величина уровня в Опасном была ниже среднемноголетнего значения на 95 см, в Заветном на 65 см и в Тамани на 53 см.

*Динамика вод Керченского пролив по данным численного моделирования.* В результате численных экспериментов были получены экстремальные значения высот волн, подъемов уровня моря и скоростей течений в 30 точках Керченского пролива.

Выполненные расчеты показали, что при западном ветре наиболее интенсивное волнение формируется в южной части пролива. Здесь максимальные высоты волн изменяются от 1,12 м при скорости ветра 10 м/с до 2,50 м при скорости ветра 17,5 м/с. В северной части пролива максимальные высоты волн при ветре 15 – 17,5 м/с могут достигать 1,0 – 1,4 м.

При южном направлении ветра высоты волн, превышающие 1 м, наблюдаются при всех анализируемых скоростях ветра в южном районе Керченского пролива. Наиболее интенсивное волнение (4,5 – 5,0 м) в данном случае зафиксировано при скорости ветра 17,5 м/с на разрезе м. Такиль – м. Панагия. В районе Крымского мостового перехода максимальная высота волн, при ветровом воздействии южного ветра скоростью 15 – 17,5 м/с, может достигать 1,0 – 2,4 м, в Тузлинской промоине – 1,41 м.

При восточном ветре со скоростью 17,5 м/с максимальные высоты волн более 1 м зафиксированы на всей акватории Керченского пролива, за исключением восточных районов Таманского и Динского заливов. В южной части пролива, при скорости ветра 15 – 17,5 м/с, высота волн достигает 2,0 – 3,0 м; а в устьях Павловской, северной, Тузлинской промоине – 1,31 м, 1,50 м и 1,24 м соответственно.

При северном ветре со скоростью 17,5 м/с наибольшие значения максимальных высот волн (2,70 – 2,73 м) получены для северного района Керченского пролива и северной узости (1,71 – 2,05 м).

Максимальные скорости течений, по данным численного моделирования, в Керченском проливе отмечены в его устьях (в районе расположения Крымского мостового перехода) при северном поле ветра с градицией скорости 17,5 м/с. Они составили в Тузлинской промоине – 1,54 м/с, а в Павловской узости – 1,0 м/с. Достаточно интенсивные течения (0,97 м/с) были получены у дистальной части Косы Чушка.

Наиболее интенсивные подъемы уровня моря зафиксированы при ветрах всех скоростей З, СВ, С, СЗ направлений. При скорости ветра 15 м/с максимальный подъем уровня моря составляет более 0,45 м при СВ, С, СЗ ветрах в северном районе Керченского пролива. При ветрах ЮЗ, Ю направлений практически во всех характерных точках пролива, кроме

мелководных участков Таманского и Динского заливов (точки 29, 30), подъемы уровня незначительные.

Как показали выполненные численные расчеты, структура ветроволновых течений в Керченской бухте определяется конфигурацией берегов, распределением глубин, наличием причальных сооружений и защитных молов. Под действием ветра и волн в бухте формируется несколько вихревых образований разного знака, количество и интенсивность которых определяется генеральным направлением ветра.

При западном, юго-западном ветре в Керченской бухте формируется два вихревых образования циклонического типа. Скорость течений в центре этих вихрей составляет 0,15 м/с, постепенно возрастая до 0,40 м/с по мере удаления от центров. Устойчивый южный, юго-восточный ветер приводит к возникновению вихрей в центральной и северной частях залива. Восточный ветер приводит к образованию сразу нескольких небольших антициклонических вихрей: в западной части залива, на северо-востоке и юго-востоке.

При северо-восточном ветре вихревые структуры образуются только на севере Керченской бухты. Под воздействием северного ветра на севере и северо-востоке залива возникают два антициклонических вихревых образования со скоростью течения 0,10 – 0,25 м/с. Северо-западный ветер приводит к возникновению двух вихревых структур: вихря антициклонического и циклонического типов.

Расчет полей волнения, течений и уровня моря в Керченском проливе, выполненный для экстремального шторма 11 ноября 2007 г. показал, что наибольшие скорости течений (свыше 1 м/с) возникают в северной узости (в районе переправы порт Крым – порт Кавказ) и у западной и восточной оконечности косы Остров Тузла. Наибольшие штормовые нагоны

(0,8 – 0,9 м) формируются в восточной и северо-восточной частях Таманского залива.

Анализ результатов численного моделирования водообмена через Керченский пролив позволил сделать следующие выводы. Направление ветра  $\theta$  существенно влияет на величину расходов воды  $Q$ . Диапазоны  $60^\circ \leq \theta \leq 105^\circ$  и  $240^\circ \leq \theta \leq 285^\circ$  соответствуют максимальным значениям  $|Q|$ , диапазоны  $165^\circ \leq \theta \leq 173^\circ$  и  $345^\circ \leq \theta \leq 353^\circ$  – минимальным значениям  $|Q|$ . После прекращения действия ветра в Керченском проливе возникают сейшеобразные осцилляции  $Q$  с периодами 10 – 12 ч.

При распространении над Керченским проливом атмосферного циклона интенсивность водообмена определяется скоростью его перемещения  $c$ . При уменьшении  $c$  увеличивается время воздействия циклона на акваторию Керченского пролива, что приводит к усилению суммарного водообмена в проливе.

Величины  $|Q|$  для реальных синоптических ситуаций могут достигать 11000 – 16000 м<sup>3</sup>/с, что согласуется с результатами расчетов  $Q$ , полученными по натурным данным.

*Опасные метеорологические явления.* Выполненные исследования показали, что в прибрежной зоне и на акватории Керченского пролива периодически возникают ОЯ: сильный штормовой или ураганный ветер; сильные осадки; туманы, значительно ухудшающие видимость и затрудняющие морские грузоперевозки в проливе; грозы и смерчи.

Анализ синоптических ситуаций показал, что наиболее часто скорости ветра, достигающие критериев ОЯ, в Керченском проливе наблюдаются при ветрах В, ВСВ и СВ направлений. Средняя скорость ветра может достигать 24 – 30 м/с и наблюдается в холодный период года с наибольшей повторяемостью в феврале – 5 случаев. Повторяемость сильных

штормовых ветров южного и юго-западного направлений при средней скорости 24-28 м/с также максимальна в феврале – 4 случая. Штормовой юго-восточный ветер со средней скоростью 28 м/с наблюдался в Керчи только один раз – 21 января 1954 г. Максимальные скорости ветра других направлений за исследованный многолетний период не превышали 20 м/с, за исключением одного случая 28.10.1969 г., когда западный ветер достигал 28 м/с.

Исследование среднего многолетнего годового количества осадков в прибрежной зоне Керченского пролива позволило выделить два района различной увлажненности: северное побережье, где за год выпадает 446 – 461 мм/год, и южное – 408 мм/год. Среднее многолетнее количество дней с осадками также возрастает с юга на север – от 80 до 108 дней в год. Абсолютный годовой максимум осадков на побережье Керченского пролива был зафиксирован в 1997 г. в Заветном – 885 мм, что составило 218% многолетней нормы. В районе Керченского пролива летом возможны интенсивные ливневые осадки (100 – 124 мм в сутки), превышающие месячную норму в 2–3 раза.

Анализ случаев сильных осадков с критериями ОЯ и синоптических процессов позволил выделить типичное распределение приземного и высотного полей барических образований над Европой, Европейской частью России и стран СНГ, приведших к выпадению осадков в акватории Керченского пролива. Большинство случаев экстремальных осадков приходится на летние месяцы и начало осени. В приземном поле давления на картах барической топографии, в случаях выпадения экстремальных сумм осадков, четко прослеживается распространение ложбины с востока на акваторию Азовского моря, восток Украины или Керченский полуостров, либо формирование циклона над Украиной, Черным и Азовским морями.

Одновременно, на синоптических картах абсолютной топографии АТ-500 наблюдается распространение высотной ложбины с северных районов, в основном со Скандинавии, Кольского полуострова, Северного Урала или Карского моря, а иногда и формирование изолированного высотного циклона над акваторией Черного и Азовского морей.

Наибольшее количество дней с сильными осадками, достигающими критериев ОЯ, с суточными суммами осадков 50 мм и более, по многолетним данным измерений морских гидрометеостанций и постов Керченского пролива, наблюдалось в июне. В этом же месяце зарегистрирован наиболее сильный ливень с суточной суммой осадков – 147 мм (06.06.1945 г.). В мае очень сильный ливень наблюдался только один раз – 15 мая 1973 г. В этот день на МГ Опасное выпало 124 мм осадков. В период с 1997 по 2002 гг. отмечен рост максимальных суточных сумм осадков, выпадающих в районе Керченского пролива, а с 2003 года по 2018 г. годовые суммы выпадающих осадков уменьшались.

Наибольшее среднее количество дней с туманом в Керченском проливе наблюдается в холодный период года с октября по апрель месяц, достигая максимальных значений в феврале и марте в северной части пролива (по данным МГ Опасное – около 5 дней). С июня по сентябрь на всех станциях побережья количество дней с туманом минимально, а на некоторых в отдельные летние месяцы вообще не наблюдается. В холодный период года туманы в среднем наблюдаются от 2 до 5 дней в месяц. По данным МГ Опасное в апреле 1963 года наблюдались 13 дней с туманом, на АМСГ Керчь в декабре 1985 года – 14 дней, а в декабре 1950 в Заветном – 17 дней.

Анализ синоптических ситуаций, приводящих к формированию сильных туманов на акватории Керченского пролива, показал, что боль-



шинство из них возникает при прохождении или стационаровании фронтальных разделов над районами Азовского моря и Керченского пролива в холодный период года. При этом по периферии антициклонов, располагающихся северо-восточнее, восточнее или южнее акватории Черного и Азовского морей, выносятся теплый и влажный воздух, вызывая формирование сильных адвективных туманов. Над районами Черного моря в это время располагается малоградиентное барическое поле или ложбина с запада, вытянутая на восток Черного моря. Сильные туманы в проливе наблюдаются и в зоне малоподвижных фронтальных разделов при прохождении циклонов или ложбин.

Максимум адвективных туманов охлаждения приходится на весенние месяцы при процессах выноса теплых и влажных масс воздуха на еще непрогретую поверхность моря. Наибольшая вероятность туманов – при антициклонах, между 3 и 12 часами, и температуре воздуха 9 – 14 °С.

В районе Керченского пролива грозы наблюдаются наиболее часто в летний период. По данным наблюдений в Керчи (1969 – 2017 гг.) максимальное среднемесячное количество дней с грозами в летние месяцы – 4 дня. В среднем за год в Керчи грозы наблюдаются 17,6 дней. Максимальное годовое количество дней с грозой (33) зафиксировано в 1976 году. В августе 2004 г. и 2006 г. число дней с грозами за 1 месяц было максимальным – 12.

Полученные в монографии результаты могут быть использованы для последующего ледового и гидрометеорологического мониторинга в районе Крымского моста, а также в задачах дальнейшего хозяйственного освоения и использования разнообразных ресурсов Керченского пролива, в целях экологического мониторинга, защиты и восстановления качества морской среды.