

Заявленный в проекте план работы научного исследования на отчетный период

Формируется в соответствии с заявкой на участие в конкурсе.

2020 г. Этап 1. Азовское море

1.1 Формирование исходных рядов (входных данных) информации с 1980 г. по 2019 г. для математических моделей для Азовского моря и Северного Каспия:

- цифровые модели рельефа дна моря, профили дельтовых областей рек, актуализация береговой линии по космоснимкам;
- скорость и направление ветра;
- осадки;
- речной сток;
- информация о ледовом режиме.

1.2 Контроль качества информации (например, контроль временного пояса, даты, выбросы)

1.3 Выполнение экспериментов по интеркалибрации реанализов:

a. выбор нескольких реанализов. На этапе заявки предлагается рассматривать реанализы CFSR, ERA-40, ERA-Interim;

b. статистический анализ выбранных данных и сопоставление с наблюдаемыми значениями;

c. обоснование выбора для будущих расчетов.

Сопоставление режимных распределений скоростей ветра и количества осадков на метеостанциях и по данным реанализа. Проведение, при необходимости, процедуры атмосферной коррекции (в соответствии с подходом, предложенным в (Бухановский и др., 2005)).

1.4 Повторная верификация моделей (при необходимости) по данным наблюдений на буйковых станциях и уровнемерах, запуск ряда тестовых расчетов.

1.5 Выполнение серий ретроспективных расчетов параметров волнения, уровня в реках и море с помощью комплекса связанных математических моделей для Азовского моря:

- SWAN
- HEC-RAS, HEC-HMS и программный комплекс ArcGIS ESRI
- ADCIRC
- Расчет нагрузки на берег от штормового волнения и речных паводков

1.6 Формирование архива спутниковых снимков для случаев ансамблей опасных гидрометеорологических явлений. Дешифрирование, обработка.

1.7 Представление результатов проекта на международных и всероссийских научных конференциях.

1.8 Подготовка двух статей по результатам работы и направление в рецензируемые научные издания, включенные в одну из систем цитирования (библиографических баз) Web of Science, Scopus.

1.9 Подготовка годового научного отчета

Заявленные научные результаты на конец отчетного периода

Формируется в соответствии с заявкой на участие в конкурсе.

В результате первого года реализации проекта будут получены следующие результаты:

1. Закономерности формирования и эволюции ансамблей опасных гидрометеорологических явлений в Азовском море и их реконструкции.

С помощью комплекса связанных математических (гидрологических, океанографических, вероятностных) моделей, данных дистанционного зондирования Земли, данных реанализов и гидрометеорологических наблюдений впервые будет выполнена реконструкция случаев сочетаний опасных гидрометеорологических явлений (ОГЯ) в азовоморском регионе с 1980 г. по 2019 г., когда одновременно наступали два и

более явления, суммарное воздействие которых приводило к усилению угрозы для жизни и здоровья людей, а также для объектов городской и туристско-рекреационной инфраструктуры).

Многокритериальный анализ полученных результатов с применением методов статистического анализа и привлечением данных метеорологических наблюдений позволит выявить причинно-следственные связи с региональными и глобальными изменениями климата, определить предпосылки возникновения таких сложных явлений, выполнить гидрометеорологическое описание совместных ОГЯ. В частности, будет выявлен перечень сочетаний ОГЯ, характерных для исследуемого региона, их пространственно-временная динамика; определены количественные характеристики; возможные типы циклонической и антициклонической активности, траектории перемещения воздушных масс.

2. По результатам проекта будут направлены в печать две статьи в журналы, входящие в базы знаний Web of Science и Scopus.

Сведения о фактическом выполнении плана работы в отчетный период (фактически проделанная работа, до 10 стр.)

Подготовлены исходные ряды данных для использования в математических моделях для условий Азовского и Каспийского морей. Выполнен контроль качества информации – проверка значений на выбросы, соответствие измерений часовому поясу, проверка глубин и береговой линии. Выполнена параметризация моделей.

Для реконструкции и выявления закономерностей формирования и эволюции ансамблей опасных гидрометеорологических явлений в Азовском море на этапе заявки выбран ряд математических моделей: SWAN, NEC-RAS, ADCIRC. Расчет нагрузки на берег от штормового волнения и речных паводков, основывается на работе (Кушнир и др., 2013; Федоров, 2016). Для расчета ударных волновых нагрузок использованы эмпирические соотношения, учитывающие изменение профиля волны и ее обрушение на пологих откосах (Смирнов, 1962 а; Смирнов, 1962 б), а для расчета ударных нагрузок – соотношения, приведенные в (Шулейкин, 1953; СНиП 2.06.04-82). Подход апробировался на стационарных расчетах волнения в Азовском море и расчетах штормового волнения в Каспийском море.

Для всех математических моделей в первый год выполнения проекта сформированы исходные ряды информации с 1980 г. по 2019 г. для Азовского моря и Северного Каспия:

- цифровые модели рельефа дна моря, профили дельтовых областей рек (картографическая информация);
- скорость и направление ветра (глобальный реанализ);
- осадки (данные наблюдений);
- речной сток (данные наблюдений);
- информация о ледовом режиме (картосхемы, данные наблюдений, космоснимки).

Исходная батиметрия для моделей SWAN и ADCIRC получена с гидрологических карт и дополнена данными эхолотных промеров из морских экспедиционных исследований Южного научного центра РАН. Расчеты проводились для специально созданных сеток с учетом особенностей моделей. Дополнительно выводились расчеты в точках, характеризующих отдельные районы моря (дельта Дона и Таганрогский залив, собственно море, север, юг и центр Керченского пролива). Также для этих точек выполнялась интеркалибрация результатов расчетов по реанализам CFSR и ERA-Interim.

В качестве ветрового форсинга использован глобальный атмосферный реанализ ERA-Interim ECMWF. Реанализ доступен с 1979 года. Временная дискретность – 1 час. Пространственное разрешение сетки реанализа составляет около 80 км.

Информация об осадках и речном стоке получена из открытых источников – Единая система информации об обстановке в Мировом океане ВНИИГМИ-МЦД (ЕСИМО), ООО «Расписание погоды», Всероссийский НИИ гидрометеорологической информации – Мировой центр данных. Предварительно для всех данных наблюдений выполнен контроль качества информации – проверка значений на выбросы, соответствие измерений часовому поясу.

Верификация модели ветрового волнения для Азовского моря является не самой простой задачей из-за отсутствия регулярных наблюдений за параметрами волнения в этом районе. Ввиду этого восстановление полей волнения приобретает еще большую актуальность. В архивах и литературных источниках были найдены сведения об отдельных штормах, в некоторых морских рейсах выполнялись попутные измерения высоты волн и их направления, частично данные наблюдений за волнением переведены в цифровой архив ЕСИМО. Результаты расчетов нагонных явлений и зон затопления верифицировались по наблюдениям на гидрометеорологическом постах ЮНЦ РАН «Кагальник» и «Донской», непрерывным наблюдениям уровнемерами компании «Эмерсит» и космоснимкам.

На этапе заявки предлагалось рассматривать ряд реанализов (CFSR, ERA-40, ERA-Interim) и выполнить их интеркалибрацию. В предыдущих работах в рамках гранта РФФИ 16-35-00318 «Исследование влияния ветрового волнения и нагонных явлений на процессы

образования и разрушения ледового покрова в Азовском море» руководителем проекта были выполнены расчеты зимних штормовых ситуаций с использованием реанализа CFSR. Поэтому в рамках настоящей работы было решено выполнить интеркалибрацию результатов расчетов, полученным по двум реанализам.

Для выполнения ретроспективного анализа штормовых явлений в Азовском море в работе использована версия 41.01A модели SWAN. Дискретность расчетов по времени составила 15 мин., учитывался ряд процессов - линейный рост волны; диссипация из-за «забурунивания»; опрокидывание волн на мелководье, вызванное изменением глубины; придонное трение, параметризованное константой спектра JONSWAP; трех- и четырех-волновое взаимодействие волн друг с другом.

В работе использовался компонент двухмерного моделирования NEC-RAS непостоянного потока, который способен моделировать одномерный непостоянный поток; двумерный непостоянный поток; или комбинированное одно и двумерное моделирование непостоянных потоков через полную сеть открытых русел, а также производить гидравлические расчеты для поперечных сечений, мостов, водопропускных труб и других гидротехнических сооружений, которые были разработаны для компонентов моделирования постоянного потока.

При расчетах динамической нагрузки на берег использованы результаты моделирования параметров недеформированной ветровой волны (средняя длина волны, значительная высота и средний период волны), полученные с помощью спектральной волновой модели SWAN и цифровая модель рельефа дна Азовского моря. Параметры недеформированной волны берутся из ближайшего (по направлению нормали) к берегу узла расчетной сетки SWAN. Рельеф дна использован для определения угла наклона дна, координат узлов береговой линии и угла направления нормали к берегу. Для определения нормали в окрестности каждого узла береговая линия аппроксимировалась прямолинейным участком.

Выполнены непрерывные расчеты волнения и уровня моря с помощью математических моделей SWAN и ADCIRC. Восстановлен волновой климат Азовского моря на основе численных экспериментов с 1979 года. Выявлены особенности среднемноголетнего режима ветрового волнения в Азовском море, сезонная и межгодовая и десятилетняя динамика.

Выполнены расчеты областей затопления при нагонных явлениях с помощью комплекса NEC-RAS. Для всех случаев сочетания штормового волнения и нагонных явлений выполнены расчеты динамической нагрузки на побережье Азовского моря.

Выполнено сопоставление всех полученных расчетных значений штормового волнения и сгонно-нагонных явлений с информацией о ледовом режиме в Азовском море. Для случаев сочетаний нагонных и штормовых явлений, а также потенциальных экстремальных сценариев, выполнен расчет динамической нагрузки на побережье и зон затопления.

Для всех полученных результатов расчетов построены карты и картосхемы. Выполнен многоуровневый статистический анализ численной и графической информации. Выполнено описание всех полученных результатов.

В разделе приведено краткое содержание выполненных работ. Полное описание работ и полученных результатов, включая графический материал, приведено в дополнительном файле к отчету.

ПУБЛИКАЦИИ И УЧАСТИЕ В КОНФЕРЕНЦИЯХ

Результаты проекта в июне 2021 г. в Москве будут представлены на международной конференции Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions (ПОАС) с публикацией статьи (индексируется Scopus, Web of Science). Из-за ограничений вследствие распространения пандемии коронавируса запланированное участие в международных

конференциях перенесено на второй год реализации проекта. В июне руководитель проекта примет участие с устным докладом в III Международной научной конференции «Закономерности формирования и воздействия морских и атмосферных опасных явлений и катастроф на прибрежную зону РФ в условиях глобальных климатических и индустриальных вызовов» памяти члена-корреспондента РАН Д.Г. Матишова ("Опасные явления – III"). В сентябре 2021 г. результаты проекта будут представлены на конференциях «Экология. Экономика. Информатика» (пос. Дюрсо) и «Моря России» (г. Севастополь, Морской гидрофизический институт РАН).

Руководитель проекта прошла краткосрочное обучение в рамках школы молодых ученых «Плавучий университет», которая проходила 18-23 апреля 2021 г. в Институте океанологии им. П.П. Ширшова РАН (г. Москва).

Подготовлены и направлены в печать статьи:

1. **Яицкая Н.А.** Волновой климат Азовского моря // Метеорология и гидрология. 2021. Scopus. В печати

2. Magaeva A., **Yaitskaya N.** Hydrometeorological hazards during the winter periods in the Sea of Azov and dynamics under the influence of climatic changes // Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. June 15-18, 2021, Moscow, Russia. Scopus, Web of Science. Июнь, 2021. В печати

3. **Яицкая Н.А.**, Шевурдяев И.В., Магаева А.А., Бригида В.С. Реконструкция опасных нагонов в Северном Каспии на основе цифровых моделей рельефа дна и гидрологического моделирования // Наука Юга России. ВАК, РИНЦ. Август, 2021. В печати

Все запланированные на первый год работы успешно выполнены. Сделан задел (подготовка исходных данных для моделей) для второго года выполнения работ.

Сведения о достигнутых конкретных научных результатах в отчетном периоде
(до 5 стр.)

1. Подготовлены исходные ряды данных для условий Азовского и Каспийского морей для использования в математических моделях. Выполнен контроль качества информации – проверка значений на выбросы, соответствие измерений часовому поясу, проверка глубин и береговой линии. Выполнена параметризация моделей.

2. Восстановлен волновой климат Азовского моря на основе численных экспериментов. Выявлены особенности среднемноголетнего режима ветрового волнения в Азовском море, сезонная и междесятилетняя динамика. Основной акцент сделан на следующие параметры – значительная высота волн (м), период волнения (сек.), высота (м) и направление (град.) волн. Выполнен статистический и картографический анализ полученных данных.

Для основных характеристик ветрового волнения наблюдается четко выраженная сезонность. Вследствие мелководности, небольших размеров и практически полной замкнутости направление и интенсивность волнения в Азовском море соответствует направлению преобладающих ветров и коррелирует со скоростью. Максимальные высоты волн до 3 м (средние до 0.8 м) характерны для холодного сезона года. С октября по апрель в азовоморском регионе, находящимся под воздействием отрога сибирского антициклона, преобладают ветры северной и северо-восточной составляющей. В это время года длина волн в центральной части моря может достигать 14 м и более. Лимитирующим фактором и своеобразной защитой для абразионного побережья моря при таком активном штормовом воздействии является только наличие прочного ледового покрова. Лед, как правило, в Азовском море наблюдается ежегодно с декабря по март. В конце зимы и весной вследствие штормовой активности на побережье Азовского моря нередко наблюдаются навалы льда.

В теплую часть года при активизации азовского антициклона преобладающее направление ветра сменяется на юго-западное и западное. Вместе с ветром направление изменяет и волнение. Высота волн уменьшается до 0.2 м, часто наблюдается штиль. В это время максимальная высота волн в центральной наиболее глубоководной части моря может достигать 2-2.5 м.

В Керченском проливе направление волнения отличается вследствие узости, наличия кос, обширных отмелей. Преобладающими являются северное и южное направления. Средние и максимальные высоты волн достигают здесь 0.6 м и 2.5 м соответственно. Такое сочетание – активное волнение и небольшая ширина – может приводить к развитию опасных для судоходства условий и частичной или полной остановке экономической деятельности в проливе.

Наибольших значений высоты волн достигают закономерно в центральной части моря, наименьших – в придельтовой части Таганрогского залива и в центральной части Керченского пролива. Эти же районы отличаются наименьшей штормовой активностью. В Таганрогском заливе практически отсутствует сезонность.

Для рассмотрения межгодовой изменчивости ветрового волнения рассмотрены аномалии от среднемноголетних значений, изменчивость по десятилетним периодам. Для межгодовой динамики волнения характерно чередование трех-пятiletних периодов усиления и ослабления волнения. Отклонения составляют до 0.13 м для центральной части Азовского моря. Наиболее продолжительным периодом является десятилетие с 2002 г. по 2013 г., когда за исключением отдельных лет ежегодно высота волн ниже среднемноголетних значений. Несмотря на то, что значения отклонений не значительны (в пределах 0.05), что может укладываться в погрешность расчетов, можно принять этот интервал за некоторую стабилизацию среднегодовых значений. Однако это является следствием своеобразного нивелирования значений внутри года – после 2002 г. высота волн в летний и осенний сезон увеличивается, а зимой и весной несколько уменьшается. Происходит некоторое смещение штормового сезона на более теплый период. Такую

динамику необходимо учитывать при прогнозировании опасных гидрометеорологических явлений, поскольку сильные штормовые явления, либо продолжительные небольшие по силе шторма в Азовском море сопровождаются нагонами, а лимитирующий развитие штормов лед в это время года отсутствует.

Наглядно видно описанную тенденцию в разрезе десятилетий. Характерно, что годы с наибольшим развитием средних высот волн не совпадают с годами наибольшего развития максимальных высот волн. И после непродолжительного уменьшения максимальных высот волн с 2008 г. отмечается постепенный рост таких значений. Это может объясняться аридизацией региона и сопутствующим ростом максимальных скоростей ветра на фоне общего снижения средних скоростей.

В целом динамика волнения для всех районов моря синхронна. За исключением Таганрогского залива. Здесь после 2000 г. максимальные высоты волн стабилизировались или даже уменьшились.

Межгодовая вариативность направления волнения достигает 100 градусов и даже более.

3. С помощью комплекса связанных математических (гидрологических, океанографических, вероятностных) моделей, с привлечением данных реанализов и гидрометеорологических наблюдений впервые выполнена реконструкция случаев сочетаний опасных гидрометеорологических явлений и их последствий (шторма, сгонно-нагонные явления, ледяной покров, затопление прибрежной зоны и динамическая нагрузка на побережье) в азовоморском регионе с 1980 г. по 2019 г., когда одновременно наступали два и более явления, суммарное воздействие которых приводило к усилению угрозы для жизни и здоровья людей, а также для объектов городской и туристско-рекреационной инфраструктуры).

Выявлена их пространственно-временная динамика; определены количественные характеристики; предпосылки возникновения и последствия таких сложных явлений, как сочетания штормов, нагонов и ледяного покрова, выполнено гидрометеорологическое описание совместных ОГЯ, связи с атмосферными и климатическими процессами.

В соответствии с Инструкцией по подготовке и передаче штормовых сообщений наблюдательными подразделениями РД 52.04.563-2013 и Перечнем и критериями опасных природных гидрометеорологических явлений, утвержденных приказом ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС» от 26.02.2016 № 22 с изменениями, утверждёнными приказами ФГБУ «Северо-Кавказское УГМС» от 17.05.2016 № 69, от 22.06.2016 № 81 и от 30.05.2017 № 65, сильным волнением в Азовском море считается волнение с высотой волны от 3.0 м и более, опасным нагоном в Таганрогском заливе – уровень 700 см и более.

С 1979 г. можно выделить 72 синоптические ситуации, при которых было возможно развитие штормовых ситуаций в Азовском море. Но в части случаев развитие штормов было лимитировано ледяным покровом более 20%. По результатам расчетов выделено 49 штормов, из них 4 в теплую половину года. Из них же 3 наиболее крупных шторма, сопровождавшихся нагонами: 15.11.1992, 11.11.2007, 24.09.2014.

В зависимости от преобладающего направления ветра во время шторма в северной части моря и Таганрогском заливе может наблюдаться нагонное или сгонное явление. Так на фоне выделенных штормов отмечается 16 сгонов и 15 нагонов в сочетании с ледяным покровом до 20% в зимние периоды.

При нагонах высота волны увеличивается на величину нагонного превышения уровня моря, приводя к катастрофическим последствиям. Зачастую перед сильным нагоном возникает небольшой сгон. Примером такого случая может служить катастрофический шторм и нагон 24 сентября 2014 г., когда высота волн в центральной части моря превышала 3.5 м, а нагона в Таганрогском заливе – 700 см.

Максимальное развитие волнения (максимальные высоты волн), характерное в среднемноголетнем режиме водоема для холодного сезона, после 2002 г. смещается на летне-осенний период. При этом для этого же сезона увеличивается продолжительность волнения высотой 1.5-2.0 м, что связано с уменьшением ледового сезона и, как следствие, развитие волнения не лимитируется ледовым покровом.

При штормовом волнении области с максимальной высотой волн сосредоточены в центральной части моря. Относительная симметричность в конфигурации береговой линии и ограниченность глубин, не дают мигрировать областям с сильным волнением, как, например, в Черном море.

Несмотря на изменения в режиме волнения, наиболее штормовыми остаются месяцы с ноября по март.

Внутрисуточной штормовой динамики не отмечается.

В Таганрогском заливе и в северо-восточной части моря опасные штормовые явления возникают в основном на фоне пониженного атмосферного давления. Это связано с прохождением циклонов над Азовским морем, которые являются одной из причин возникновения штормовых нагонов и при некоторых траекториях могут приводить к экстремальным явлениям. Как, например, при движении через Черное море и Керченский пролив.

Нагонное увеличение уровня моря на 700 см и более происходит при практически полном отсутствии льда в Азовском море, немного повышенном или близком к нормальному (1013 гПа) атмосферном давлении и 3-ЮЗ направлениях ветра. Увеличение уровня моря в пределах 1–2 м может происходить в равной степени как на фоне пониженного, так и на фоне повышенного атмосферного давления. При этом в море в зимний период может наблюдаться лед до 20 %. Интересным представляется изменение направления ветра. При пониженном атмосферном давлении преобладающее направление может варьироваться в диапазоне Ю-З, а при повышенном – ЮЗ-З с максимальными скоростями (более 15 м/с). Увеличение уровня моря до 1 м происходит также, как и в предыдущем случае, на фоне пониженного (с ЮВ и СЗ ветрами), либо повышенного (с ЮЗ ветрами) атмосферного давления. При этом в зимний период растет доля площади моря, занятая льдом, и колеблется в широких пределах – от 0 до 40%. При максимальном развитии ледового покрова зимой наблюдается минимальное увеличение уровня моря и небольшое по силе волнение.

Максимальная нагрузка на берег достигает 5-8 тс/м². При штормовых нагонах нагрузка до 2 тс/м² приходится на южный берег Таганрогского залива и косы.

Полное описание полученных результатов, включая графический материал, приведено в дополнительном файле к отчету.

Описание выполненных в отчетном периоде работ и полученных научных результатов для публикации на сайте РНФ на русском языке

(до 3 страниц текста, также указываются ссылки на информационные ресурсы в сети Интернет (url-адреса), посвященные проекту)

За первый год выполнения работ подготовлены исходные ряды данных для условий Азовского и Каспийского морей для использования в математических моделях. Выполнен контроль качества информации – проверка значений на выбросы, соответствие измерений часовому поясу, проверка глубин и береговой линии. Выполнена параметризация моделей.

Восстановлен волновой климат Азовского моря на основе численных экспериментов с 1979 г. Выявлены особенности среднесезонного режима ветрового волнения в Азовском море, сезонная, межгодовая и междесятилетняя динамика. Основным акцентом сделан на следующие параметры – значительная высота волн (м), период волнения (сек.), высота (м) и направление (град.) волн. Выполнен статистический и картографический анализ полученных данных.

С помощью комплекса связанных математических (гидрологических, океанографических, вероятностных) моделей, с привлечением данных реанализов и гидрометеорологических наблюдений выполнена реконструкция случаев сочетаний опасных гидрометеорологических явлений и их последствий (шторма, сгонно-нагонные явления, ледяной покров, затопление прибрежной зоны и динамическая нагрузка на побережье) в азовоморском регионе с 1979 г. по 2019 г. Для случаев сочетаний нагонных и штормовых явлений, а также потенциальных экстремальных сценариев, выполнен расчет динамической нагрузки на побережье и зон затопления.

Выявлена их пространственно-временная динамика; определены количественные характеристики; предпосылки возникновения и последствия таких сложных явлений, как сочетания штормов, нагонов и ледяного покрова, выполнено гидрометеорологическое описание совместных ОГЯ, связи с атмосферными и климатическими процессами.

Результаты проекта доступны на сайте Субтропического научного центра РАН https://subtropas.ru/yaitskaya-natalya-aleksandrovna_1/

на английском языке

Перечень публикаций за отчетный период по результатам проекта

1. **Яицкая Н.А.** Волновой климат Азовского моря // Метеорология и гидрология. 2021. Scopus, Web of Science. В печати
2. Magaeva A., **Yaitskaya N.** Hydrometeorological hazards during the winter periods in the Sea of Azov and dynamics under the influence of climatic changes // Proceedings of the 26th International Conference on Port and Ocean Engineering under Arctic Conditions. June 15-18, 2021, Moscow, Russia. Scopus, Web of Science. Июнь, 2021. В печати
3. **Яицкая Н.А.,** Шевердяев И.В., Магаева А.А., Бригида В.С. Реконструкция опасных нагонов в Северном Каспии на основе цифровых моделей рельефа дна и гидрологического моделирования // Наука Юга России. ВАК, РИНЦ. Август, 2021. В печати