



ЮЖНЫЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР РАН

## Многолетние изменения в экосистеме Азовского моря. Что следует ожидать в будущем?

Бердников Сергей Владимирович  
Сорокина Вера Владимировна  
+7 928 296-04-75  
berdnikovsv@yandex.ru

Ростов-на-Дону - 2022

Добрый день всем.

В Москве на 24 школе по морской геологии, посвященной памяти ак. А.П.Лисицина, сделано это сообщение и сегодня я открываю серию научных докладов на Ученом совете ЮНЦ РАН, посвященных юбилею.

В этом сообщении сделана попытка обобщить результаты, полученные в ЮНЦ РАН в области изучения экосистемы Азовского моря и сформулировать некоторые гипотезы и предположения, связанные с будущим моря.



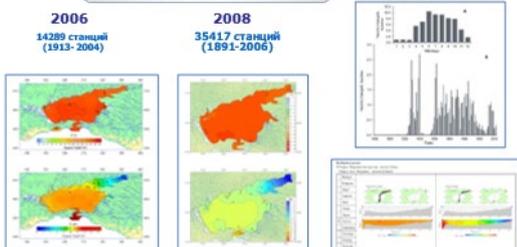
Экспедиции ЮНЦ РАН с 2002 г.



ЮНЦ РАН проводит исследование Азовского моря с 2002 г. Черные точки – т.н. морские станции, где выполнялись наблюдения.



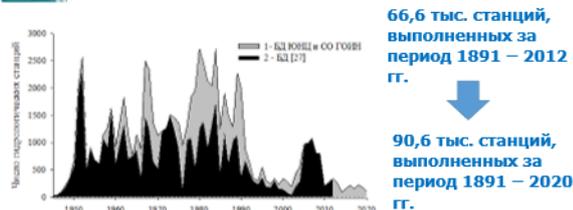
БАЗЫ ДАННЫХ И КЛИМАТИЧЕСКИЕ АТЛАСЫ



Совместно с американским агентством по океану и атмосфере мы включились в проект т.н. археологии данных, собирая, систематизируя и публикуя в открытом доступе в форме климатических атласов базу данных по первичной океанографической информации. В 2014 г. опубликованы данные почти по 67 тыс. морских станций.

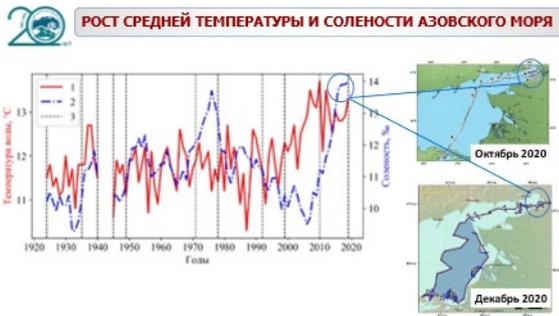


Океанографические станции в Азовском море



1 – атлас Atlas of Climatic Changes in Nine Large Marine Ecosystems of the Northern Hemisphere (1827–2013) // NOAA Atlas NESDIS 78 / Matichov G.G., Sherman K., Levitus S. (Eds.) – Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office, 2014. – 131 p. ; 2 – совместная база данных ЮНЦ РАН и СО ФГБУ «ГОИН»

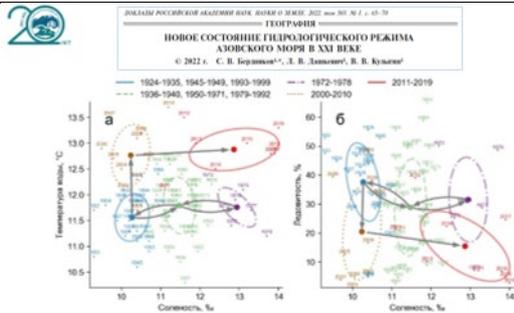
Совместно с Севастопольским отделением ГОИН мы практически собрали и заканчиваем проверять БД, которая содержит уже 90 тыс. морских станций. Преимущественно это данные по солености и температуре воды, но есть большой пласт информации по гидрохимии и гидрологии Азовского моря. В планируемый к изданию климатический атлас Азовского моря 2020 будут добавлены данные по прибрежным станциям, непрерывному профилированию морской среды и спутниковые карты.



На основе БД 2014 г., дополненной судовыми наблюдениями последних лет, рассчитаны средние по морю среднегодовые значения солёности и температуры воды Азовского моря.

Наблюдается рост температуры воды с начала 21 века и стремительный рост солёности с 2007 г.

В осенне-зимний период воды солёностью 10 г/л встречаются у морского края дельты Дона.



На представленных здесь диаграммах видно, что экосистема Азовского моря перешла в состояние, которое ранее не наблюдалось.

**Однокомпарментальная модель водного и солевого баланса Азовского моря**

$$V(t+1) = V(t) + Q_{riv} + Q_{prec} + Q_{ba} - Q_{evap} - Q_{ab}$$

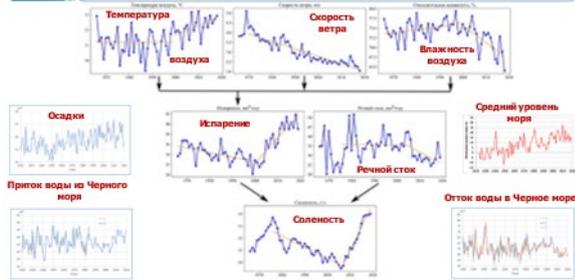
$$S(t+1) = [S(t)V(t) / V(t+1) + S_b Q_{ba} / V(t+1)] / [1 + \kappa Q_{ab} / V(t+1)], \quad (1)$$

- $V(t+1)$  - объем Азовского моря на конец года, км<sup>3</sup>;
- $V(t)$  - объем Азовского моря на начало года, км<sup>3</sup>;
- $Q_{riv}$  - приток речных вод, км<sup>3</sup>/год;
- $Q_{prec}$  - осадки, км<sup>3</sup>/год;
- $Q_{evap}$  - испарение, км<sup>3</sup>/год;
- $Q_{ba}$  - приток воды из Черного моря, км<sup>3</sup>/год;
- $Q_{ab}$  - отток воды в Черное море, км<sup>3</sup>/год;
- $S(t+1)$  - средняя солёность моря в конце года, ‰;
- $S(t)$  - средняя солёность моря в начале года, ‰;
- $S_b$  - солёность черноморских вод, ‰;
- $\kappa$  - параметр, отражающий тот факт, что вода, вытекающая из Азовского моря в Чёрное, имеет солёность больше, чем средняя величина по морю;
- $S_a = [S(t+1) + S(t)] / 2$  - среднегодовая средняя солёность моря, ‰.

Для понимания причин происходящих изменений рассмотрена простая система двух уравнений: водного баланса и средней по морю солёности воды.



#### Основные факторы, определяющие многолетнюю динамику среднегодовой средней по Азовскому морю солёности его вод



С начала прошлого века растет уровень моря, примерно 15 см за 100 лет, но в последние годы рост замедлился. Эта информация требует проверки, т.к. имеются сведения, что измерительные береговые посты давно не проходили метрологию.

Анализ основных компонентов водного и солевого баланса моря позволяет выдвинуть гипотезу о преимущественной роли испарения в столь значительных темпах увеличения солёности.

В первый периода сильного осолонения моря в 1970-х годах, возможно, кто-то помнит, что все прогнозы были не утешительными. Обсуждались проекты переброски стока северных рек, регулирования водообмена через Керченский пролив и между Таганрогским заливом и центральной частью моря.

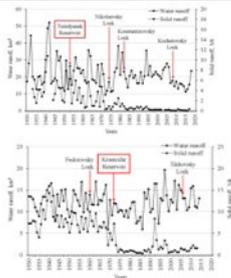
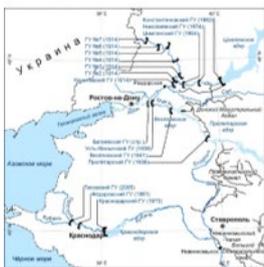
Потом солёность начала падать, причина этого до конца не была понятна. Но на этой диаграмме видно, что из-за ветровой депрессии, которая продолжается до сих пор, как раз испарение в этот период уменьшалось.

В начала 21 века вместе с ростом температуры воздуха в регионе уменьшается относительная влажность, в результате возрастает дефицит влажности и это стимулирует рост испарения. А с 2007 г. дополнительно наступает период маловодья на Дону, который продолжается уже более 15 лет.

Хотя величина испарения над водной поверхностью напрямую не измеряется, эта гипотеза пока является наиболее реалистичной для объяснения происходящих изменений



### Динамика жидкого и твердого стока



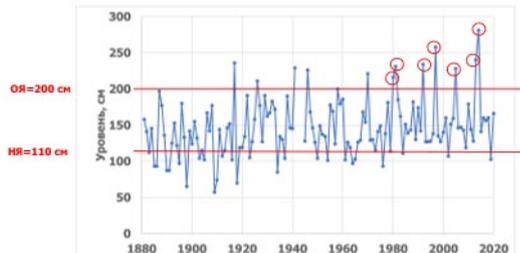
В Азовское море впадает две основных реки - Дон и Кубань. Их сток зарегулирован строительством плотин и водохранилищ. В этом году начнется строительство еще одного Багаевского гидроузла в районе х. Арпачин с целью обеспечить достаточные глубины для прохода судов водоизмещением 5 тыс. тонн.

Представленные здесь графики многолетнего изменения стока Дона и Кубани показывают вклад плотин и водохранилищ в изменение поступления взвешенных веществ с речными водами

В результате гидротехнического строительства сток взвешенных веществ в Азовское море значительно сократился, Дона - в 10 раз и более в период последнего маловодья, Кубани - в 4 раза (по сравнению со стоком до зарегулирования рек).



### Ежегодный максимальный уровень воды в Азове

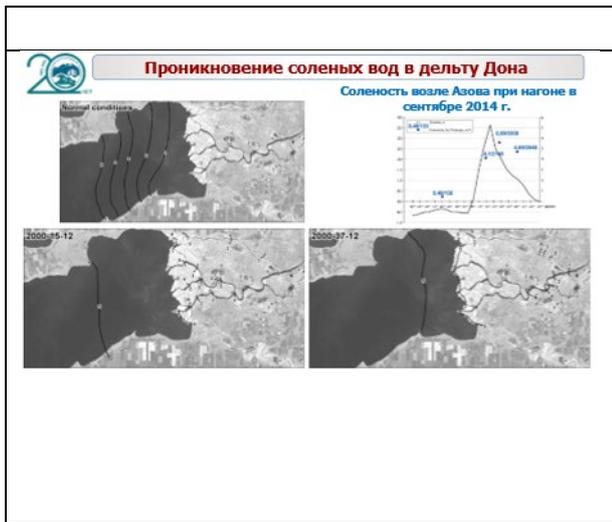


На этом слайде на основе БД, собранной МГУ и дополненной нашими цифрами, показаны максимальные годовые уровни воды в Дону в створе г. Азов, расположенного в 20 км от морского края дельты.

Парадоксально, что несмотря на наблюдаемую в регионе ветровую депрессию за последние 50 лет у Азова уровень воды 7 раз превысил отметки опасного явления.

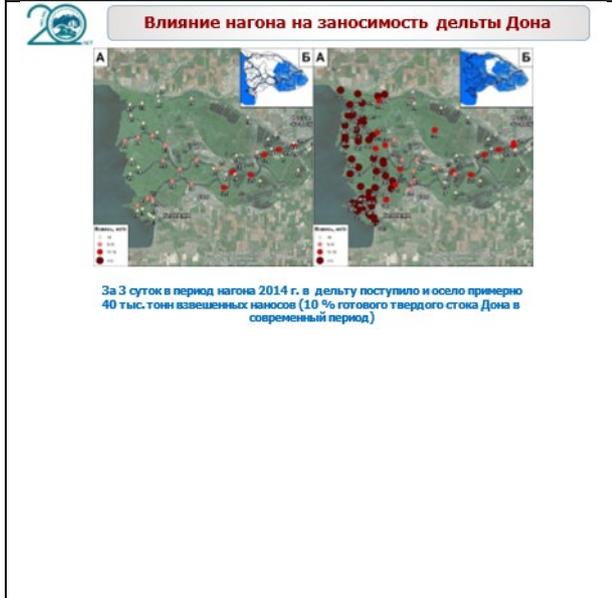
И связано это было не с речными наводнениями, а с нагонными явлениями.

Особенно значительным был нагон в сентябре 2014 г., когда уровень воды поднялся более чем на 3 м, вся дельта была затоплена.



Еще одним эффектом роста солености моря в сочетании с нагонными явлениями стало проникновение соленых вод в дельту.

Зона контакта речных и морских вод часто находится в дельте, а не на ее морском крае, что может существенно изменять процессы на биогеохимическом барьере река-море.

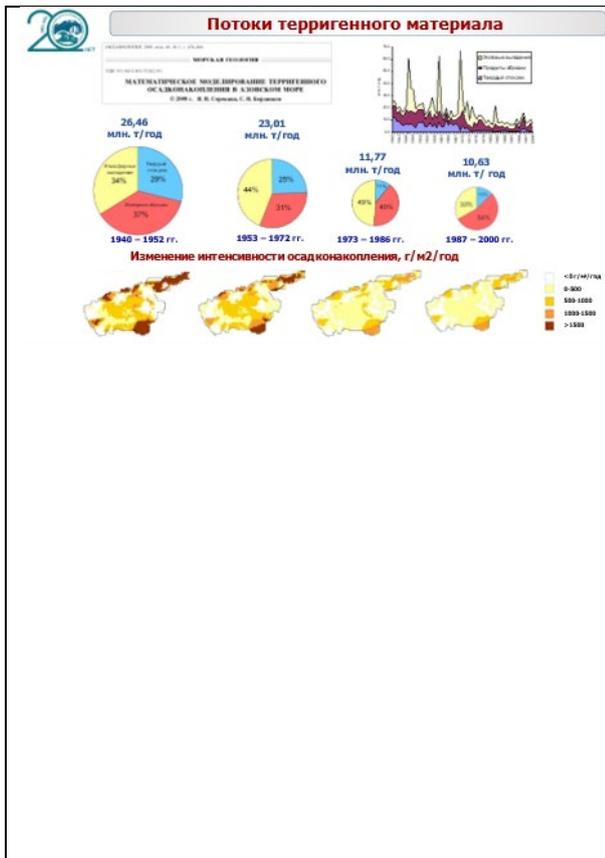


При сильных нагонах со стороны Таганрогского залива в дельту Дона поступают насыщенные взвешенным веществом водные массы. На затопленных участках, где скорости водного потока ослабевают, взвесь, в том числе и переносимые ею химические соединения, оседают и накапливаются.

С применением гидрологической модели показано, что за 3 дня нагона в сентябре 2014 г. в дельту могло поступить и там осесть 40 тыс. тонн взвешенных наносов, примерно 10% годового стока Дона



Была разработана математическая модель динамики взвешенного вещества в Азовском море, которая учитывает кроме водного и вещественного обмена между районами процессы оседания взвеси и взмучивания донных отложений в зависимости от ветрового волнения. Источниками поступления взвеси являются реки, разрушение берегов и эоловые выпадения, главным образом связанные с пыльными бурями.

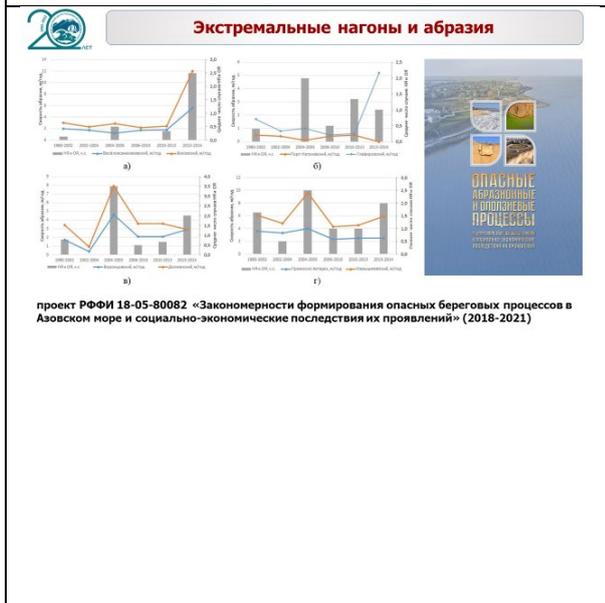


В 2008 г. мы показали существенную трансформации структуры и объема потоков терригенного материала во второй половине 20 века.

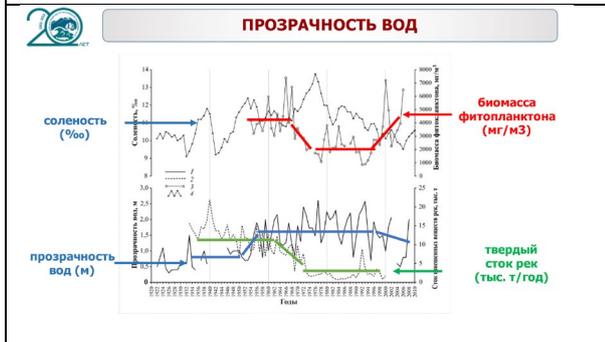
В 70-80-х гг. прошлого века эоловый фактор, а в 90-2000-х гг. абразия берегов являлись преобладающими в поставке седиментационного материала в море.

За рассматриваемый период общий объем поступления терригенного материала в море сократился в 2,5 раза по сравнению с периодом до зарегулирования.

Произошло уменьшение скоростей накопления твердого вещества в донных отложениях, увеличилась площадь размыва дна.



Недавно мы закончили исследование по изучению опасных абразионных и оползневых процессов в береговой зоне моря, включая и современный период. Из-за отсутствия данных наблюдений по северному побережью центральной части Азовского моря не получены пока обобщающие оценки абразионной поставки материала, но наблюдения по Таганрогскому заливу дают основания предположить интенсификацию этого процесса из-за увеличения частоты сильных нагонных явлений и роста уровня моря.

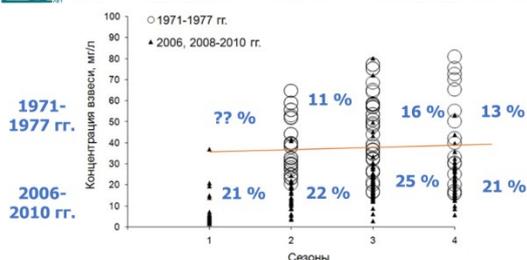


Сокращение твердого стока рек, рост солености в 1970 г. и уменьшение биомассы фитопланктона привели к увеличению прозрачности вод.

В текущий период прозрачность вод опять начала снижаться, но пока нет достаточно информации, чтобы делать однозначные выводы.



### Взвесь Таганрогского залива



Но интересно следующее.

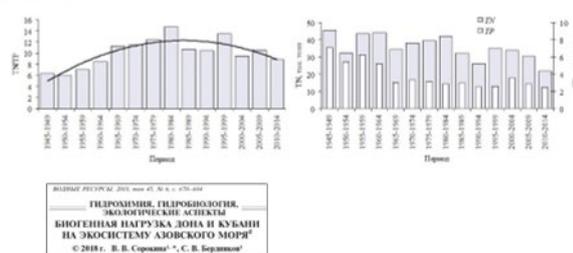
На слайде приведено сравнение концентрации взвеси в море для двух периодов.

Выше красной линии - для лет, предшествующего первому периоду осолонения, концентрация общей взвеси была больше, а доля органического вещества в ней 10-16%.

Ниже красной линии - в начале второго периода осолонения, концентрация общей взвеси была ниже и соответственно выше прозрачность, но доля органического вещества, определяемая биомассой водорослей, детритом и продуктами жизнедеятельности других организмов, превышает уже 20%.

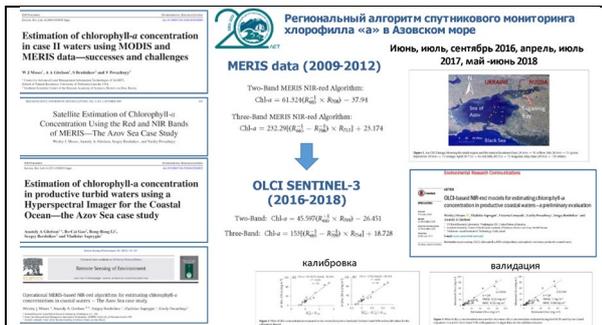


### ПОСТУПЛЕНИЕ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ С РЕКАМИ



Продукционные процессы в море существенным образом определяются поставкой биогенных элементов с речным стоком. Мы систематизировали опубликованные и собственные данные поступления всех форм азота(TN) и фосфора (TP) с речным стоком более чем за 60-летний период и выяснили, что наблюдается процесс восстановления соотношения общего азота и к общему фосфору как это было в период до зарегулирования, т.е.  $TN/TP = 7.0$ .

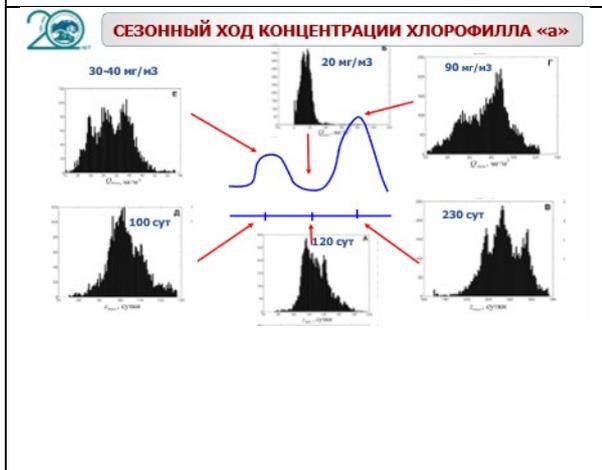
При этом соотношения взвешенных и растворенных, минеральных и органических форм каждого элемента не соответствуют гидрохимическому режиму до масштабного гидротехнического преобразования на Нижнем Дону: уменьшение величины  $TN/TP$  в современный период обусловлено некоторым снижением стока минеральных форм азота и увеличением стока растворенных форм фосфора (большой частью минеральных).



Совместно с американскими коллегами разработан алгоритм дешифрирования концентрации хлорофилла «а» по спутниковым данным спектро радиометров MODIS и MERIS, который хорошо себя зарекомендовал для мутных и продуктивных вод второго типа.

По концентрации хлорофилла «а» оценивается биомасса одноклеточных водорослей, в том числе и т.н. синезеленых или цианобактерий, среди которых есть токсичные виды.

В апреле 2012 г. MERIS перестал работать, накопив значительную БД снимков и в настоящее время алгоритм прошел валидацию для нового спектро радиометра OLCI, установленного на европейских спутниках серии Sentinel



Анализ спутниковых снимков спектро радиометра MERIS за период его работы с 2003 по 2012 гг. позволил установить изменение сезонного хода концентрации хлорофилла в Таганрогском заливе – вместо традиционного весеннего пика, отмечаемого ранее в литературе, наблюдается осенний и больший по масштабу весеннего в 2 раза.

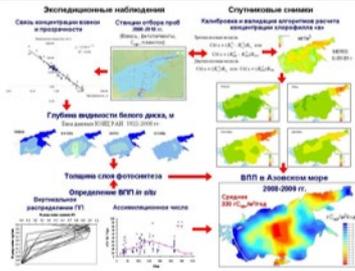


В начале 21 века концентрация хлорофилла «а» системно увеличивалась, прежде всего в Таганрогском заливе.

В период 2016-2019 гг. по данным спектро радиометра OLCI дальнейшего роста концентрации хлорофилла «а» в море мы уже не наблюдаем. Возможно, это влияние роста солености.



**Оценка первичной продукции в Азовском море по спутниковым данным**



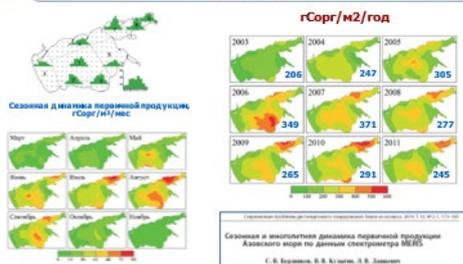
Оценки первичной продукции в Азовском море – это одна из важнейших задач, которая до сих пор в полной мере не решена.

Прямые измерения первичной продукции в море системно не проводились. Хотя большая скорость продукционных процессов позволяет использовать традиционный скляночный метод. Но это требует суточных станций и трудоемких операций. Поэтому делается редко.

Нами разработана полуэмпирическая модель, использующая спутниковые снимки концентрации хлорофилла и оцененные по экспедиционным данным параметры модели.



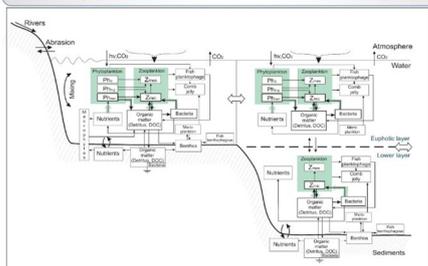
**Первичная продукция в Азовском море (2003-2012)**



С помощью это модели и спутниковых снимков MERIS мы оценили величину ПП в море, которая изменяется в пределах 206-307 г Сорг/м<sup>2</sup>/год.



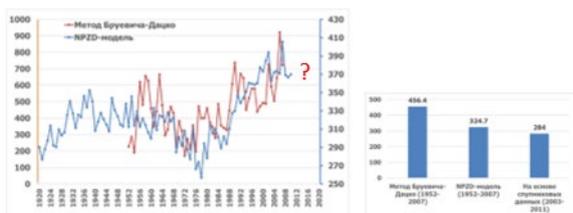
**Динамическая NPZD- модель (биогенные элементы – фитопланктон – зоопланктон - детрит)**



В дополнение к полуэмпирической модели на основе данных наблюдений была настроена динамическая NPZD-модель, включающая такие переменные состояния как биогенные элементы, биомассу фитопланктона и зоопланктона, детрит (мертвое органическое вещество) для оценки первичной продукции.



### Годовая первичная продукция в Азовском море, гСорг/м2/год



В рыбохозяйственной науке основным методом оценки первичной продукции в Азовском море был и является сейчас метод Бруевича, разработанный им для Каспийского моря. Он основан на измерении разности содержания растворенного кислорода в воде утром и вечером на одной станции.

В дальнейшем он был модифицирован Дацко, который предполагал, что для оценки первичной продукции в море не обязательно стоять на одном месте, а можно использовать сеть наблюдений за содержанием кислорода в рамках ежеквартальных съемок на 34 станциях по всей акватории моря.

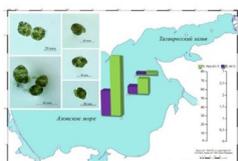
Мы показали, что такой подход может быть источником ошибок.

Хотя межгодовая изменчивость величины ПП, оцененная по методу Бруевича-Дачко и с помощью NPZD-модели похожа, но сегодня мы имеем разные оценки абсолютных величин первичной продукции и их межгодовых вариаций.



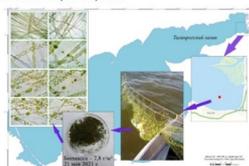
### Изменения в фитопланктоне Азовского моря

В открытой части моря отмечено развитие морского представителя динофлагеллат – *Coscinodinium cf. geminatum* (Schütt) Schütt, ранее не встречавшегося в данном водоеме



Населенность (N, тыс. кл./л) и биомасса (B, мг/л) *Coscinodinium cf. geminatum* в акватории Азовского моря

Новое явление на морском крае дельты Дона – обильное обрастание рыболовных сетей нитчатыми водорослями из рода *Spirgyra*, основным представителем которых был газофильный, широко распространенный, эврибионтный вид *Spirgyra cf. decimata* (Müller) Kütz.



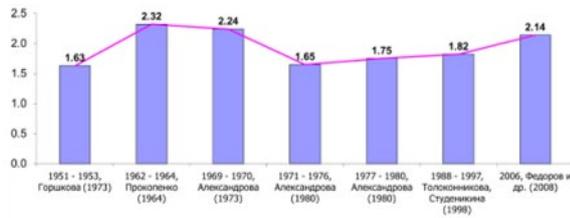
Место обитания нитчатых водорослей *Spirgyra cf. decimata* на территории дельты Дона

В море стали появляться ранее не наблюдавшиеся здесь виды динофитовых, а в прошлом году сети рыбаков в Таганрогском заливе бы забиты нитчатыми водорослями, которые также ранее не встречались.

В связи с появлением новых видов водорослей, не свойственных экосистеме моря, трудно понять, что следует ожидать в перспективе для первичной продукции, когда одновременно растет и соленость и температура вод.



### Органическое вещество в донных отложениях Азовского моря, %



Иногда указываются величины ПП на уровне 700 гСорг/м<sup>2</sup>/год. Способна ли экосистема переварить такой объем продуцируемой органики и куда девается не окисленное органическое вещество?

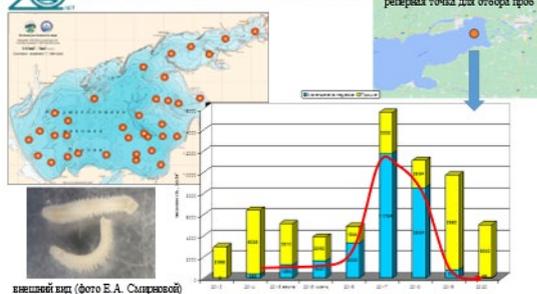
Один из возможных путей захоронения органики – донные отложения, но содержание органики на дне относительно не велико, хотя и наблюдается ее увеличение.

Это может быть, с одной стороны, связано с увеличением потока органики на дно из-за роста первичной продукции, с другой - с уменьшением потока терригенного материала, т.е. эффектом «разбавления» верхнего слоя осадка.

Есть и методические проблемы отбора проб и их анализа, но в ЮНЦ эти работы не проводятся из-за отсутствия нужной приборной базы. Возможно, договор с ИО РАН позволит нам получить оценки для современного периода.



### Распространение полихеты *Marenzelleria neglecta*



Полихета маренцелерия с 2014 г. стала наблюдаться по всей акватории моря. С одной стороны, это положительный фактор, учитывая ее способность к т.н. биотурбации донных осадков, в результате чего органическое вещество может окисляться интенсивнее. Но наблюдения на реперной точке в Таганрогском заливе показали снижение ее численности после достижения пика в 2017 г. По мнению Н.И.Булышевой, либо она заняла свою нишу, либо в условиях повышенной солености ей не комфортно.

**Креветка *Palaemon macrodactylus* и *Rapana venosa* Азовском море и на Нижнем Дону**






Креветка *Palaemon macrodactylus* Rathbun, 1902 (1907)

Известное распространение креветки *Palaemon macrodactylus* в Азово-Черноморском бассейне и наши находки в Таганрогском заливе и реке Дон (на врезе)

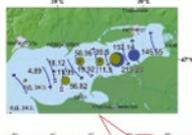
Кладка *Rapana venosa* на моллюске *Mytilus galloprovincialis* и место находки, Должанская коса, июль 2021 г.

**Н.И.Булышева, устное сообщение**

Вот эта креветка слева – вселенец - обнаружена в Таганрогском заливе и на Дону. Через 2 дня из типографии поступит препринт, написанный ак. Г.Г.Матишовым с соавторами, в котором рассматриваются вопросы аквакультуры этого вида в нашем регионе.

Более серьезная проблема связана с находкой кладки моллюска рапаны на Должанской косе. Осенью прошлого года мы хотели посмотреть ее присутствие в этом районе, но эта акватория была закрыта для исследований.

**Желетельные в экосистеме Азовского моря**






Многолетняя динамика численности желетельного макропланктона (по Мирзоян и др., 2019)

*Mnemiopsis leidyi* (август 2018, г.с.в./мЗ)

В конце 80-х годов прошлого века в Азово-Черноморскую экосистему вселился желетельный планктонный хищник гребневик мнемииопсис, которого обвиняли в подрыве рыбного промысла хамсы.

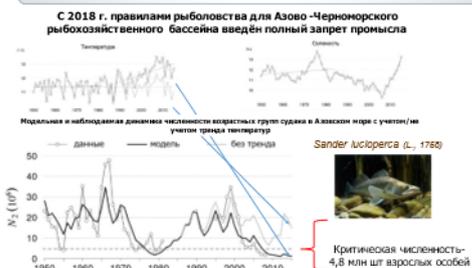
По-прежнему наблюдаются высокие концентрации мнемииопсиса в Таганрогском заливе в конце лета и осенью, при этом редко в центральной части. Основной механизм – пассивная миграция с водными массами из Черного моря, т.к. в Азовском он зимой вроде не выживает.

Но я допускаю, что существует дополнительный механизм переноса личинок мнемииопсиса в этот район с балластными водами судов, которые в Керченском проливе сдают свой груз нефти, заполняют танки водой, а потом сбрасывают балласт перед входом в реку.

Интересно также наблюдение, что если в 1970 годы при осолонении моря медуза аурелия активно заходила в море, то в современный период это вроде не так.



### СУДАК В ЭКОСИСТЕМЕ АЗОВСКОГО МОРЯ. ТЕНДЕНЦИИ И ОЦЕНКИ



Этот заключительный слайд иллюстрирует тенденции, которые нас ожидают.

В конце 80-х годов Ю.В.Тютюнов построил относительно простую математическую модель динамики численности популяции судака, которая учитывала два фактора среды — температуру и соленость вод и промысел. Модель была откалибрована. Была получена оценка т.н. критической численности порядка 5 млн штук взрослых особей, ниже которой риск вымирания популяции возрастает. Потом о модели забыли на 20 лет. После появления новых данных о динамике численности судака была выполнена валидация модели, проверка ее работоспособности без изменения исходных параметров. Результат сравнения с оценочными данными рыбохозяйственной науки показал снижение численности ниже критической. Но если бы увеличивалась только соленость у модельной популяции есть шанс восстановится в условиях полного запрета промысла в 2018 г., но с учетом изменения температуры моря риск вымирания резко увеличился.

Без специальных мер по воспроизводству этой популяции трудно ожидать, что она восстановится.