

Форма 503 М

РАЗВЕРНУТЫЙ НАУЧНЫЙ ОТЧЕТ

Проект РФФИ № 12-05-91170

Исследование причинно-следственных факторов, приводящих к изменениям полей фитопланктона при прохождении глубоких циклонов над тропическими и полярными акваториями

РУКОВОДИТЕЛЬ: ПОЗДНЯКОВ Д. В., Фонд «Нансен – Центр»

НОМЕР ПРОЕКТА: 12-05-91170

НАЗВАНИЕ ПРОЕКТА Исследование причинно-следственных факторов, приводящих к изменениям полей фитопланктона при прохождении глубоких циклонов над тропическими и полярными акваториями

КОДЫ КЛАССИФИКАТОРА, СООТВЕТСТВУЮЩИЕ СОДЕРЖАНИЮ ФАКТИЧЕСКИ ПРОДЕЛАННОЙ РАБОТЕ:

05-511 05-512 05-516 05-543 05-549

АННОТАЦИЯ

Впервые выполнено обширное многолетнее исследование влияния циклонической деятельности на первичную продуктивность в широких широтах, а именно в Арктическом бассейне в акватории Баренцева моря. Исследования проводились с применением как спутниковых данных видимого, инфракрасного и микроволнового диапазонов (датчики SeaWiFS, MODIS (Terra & Aqua), QuickSCAT, SSM/I), AMSR-E Aqua [для последующих восстановлений скоростей приводного ветра и температуры поверхности океана]; AMSU-B со спутников серий NOAA [для определения интенсивности осадков, Jason, TOPEX/POSEIDON(T/P), Geosat Follow-On (GFO), ERS-2 и Envisat спутников [для получения альтиметрических данных, так и данных NCEP/NCAR, а также с привлечением результатов натурных (в т.ч. метеорологических и судовых) измерений. Данные о параметрах циклона, его траектории, барических полях, приповерхностных скоростях ветра, скорости передвижения циклона и пространственно-временной динамике облачного покрова использовались для интерпретации/ выявления причинно-следственных проявлений наблюдаемых с орбиты спутников вариаций биофизических полей в акватории Баренцева моря: на период 2003-2012 гг. исследовалась динамика биомассы фитопланктона (в качестве индикатора выступала концентрация хлорофилла-а – chl) в поверхностном слое и температура поверхности воды –ТПВ как по трассе прохождения циклона, так и по всей акватории Баренцева моря в течении всего вегетационного периода (апрель-август).

За указанные годы было выявлено прохождение более 90 циклонов в период с начала марта по конец сентября, когда условия облачного покрова оказывались пригодными для получения спутниковой информации в видимом и инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра по значительной части траектории циклона. Для дальнейшего анализа были выбраны циклоны, время прохождения которых по акватории Баренцева моря не превышало трех дней (их число оказалось равным 22). Спутниковые данные собирались за период пяти дней, предшествующих появлению циклона над акваторией моря, а затем в течение 5 пяти дней, отсчитываемых от

момента рассеивания (по крайней мере, частичного) облачного покрова над траекторией циклона.

Анализ полученных спутниковых данных по chl и ТПВ, в казалось бы пестрой картине пространственно-временных вариаций данных параметров, позволил выявить существование трех типов ситуаций, связанных с прохождением циклонов: 1. chl и ТПВ снижались непосредственно сразу после прохождения циклона, а затем (на четвертый-пятый день) обнаруживали рост, длящийся, как правило, не менее 5-6 дней, 2. chl и ТПВ возрастали непосредственно (в большинстве случаев – на второй день) после того, как циклон покидал акваторию моря, а затем довольно быстро снижались, и наконец, 3. когда по спутниковым данным не обнаружилось каких-либо модуляции полей chl и ТПВ в результате прохождения циклона.

Важно, что циклон-обусловленные возрастания концентрации chl регистрировались не только в периоды высокого первичного продуцирования (середина мая-июнь и середина августа), но также и в периоды низких уровней развития фитопланктона (апрель-начало мая и июль-конец августа).

Для упомянутых трех типов реакции первичного продуцента Баренцева моря и ТПВ на прохождение циклона, были выявлены соответствующие причинно-следственные механизмы и факторы, обуславливающие реализацию каждого их трех выше упомянутых типов.

Статистический анализ реализации случаев 1-3 за указанные годы наблюдений позволяет на высоком уровне вероятностной достоверности утверждать, что в Баренцевом существенно преобладающим следствием прохождения циклона является возрастание chl (т.е. биомассы фитопланктона). Расчеты показывают, что при достаточно протяженных траекториях, площадь полосы возрастания БФ относительно общей площади развития фитопланктона по акватории на момент прохождения циклона над Баренцевым морем могла в среднем составлять 14 %.

Соответственно в аналогичном соотношении находился и эффект увеличения БФ.

Однако следует иметь в виду, что, судя по результатам проведенного нами исследования, увеличение БФ в акватории Баренцева моря в результате циклонической деятельности имеет 1. существенно локальный характер, 2. низкий уровень повторяемости, и 3. степень влияния на общий уровень первичного продуцирования в этом морском районе за вегетационный период достаточно низка.

Это обстоятельство должно рассматриваться в купе с результатами полученной нами статистики по циклонам в районе исследования за предыдущий десятилетний период: они не дают никаких оснований предполагать, что с продолжающимся потеплением климата в Арктике, по крайней мере в вегетационный период, будет происходить рост числа циклонов в этом регионе. Следовательно, нет оснований ожидать в ближайшем будущем в Баренцевом море и устойчивого усиления первичного продуцирования по этому механизму.

Сравнивая наши результаты с результатами аналогичных исследований, полученными в низких широтах нашими китайскими коллегами, а также другими исследователями, можно констатировать следующие наиболее существенные отличительные черты:

1. в Баренцевом море существует (в дополнение к уже известным) механизмам воздействия циклона на БФ не сообщавшийся в опубликованных работах по низким широтам (связанный с субдукцией атлантических вод, поступающих в Баренцево море).

2. Продолжительность периода возрастания БФ в Баренцевом море. как правило, не превышает 1 недели, тогда как в низких широтах она может составлять несколько недель, вплоть до месяца.
3. Уровень влияния циклона на первичное продуцирование в Баренцевом море в ряде случаев вполне сравним с аналогичными оценками для ряда акваторий нижних широт, хотя при этом сообщаются и случаи, когда годовая первичная продуктивность существенно возростала (30-60%; 90%; в 2-3 раза, и даже в 60 раз!)

ЦЕЛИ ПРОЕКТА И СТЕПЕНЬ ИХ ВЫПОЛНЕНИЯ

Объявленные ранее цели проекта на 2013 год:

- Прежде всего –окончание обработки всех синергетических спутниковых данных по прохождению глубоких циклонов над Баренцевым морем на период 2002-2012 гг., и создание на этой основе общей климатологической картины данного явления.
- Установление климатически значимых особенностей данного явления (т.е модуляции биомассы фитопланктона) в северных широтах
- Численная оценка значимости исследуемого явления с точки зрения внутри- и межгодовой динамики первичной продуктивности
- Сравнение выявленных закономерности и выполненных численных оценок для высоких и низких широт (в том числе и с точки зрения конкретной природы движущих механизмов).

Степень достижения поставленных в проекте целей:

1. Окончена обработка всех синергетических спутниковых данных широкого спектрального диапазона (т.е. датчики SeaWiFS, MODIS (Terra & Aqua), QuickSCAT, SSM/I), AMSR-E Aqua [для последующих восстановлений скоростей приводного ветра и температуры поверхности океана]; AMSU-B со спутников серий NOAA [для определения интенсивности осадков, Jason, TOPEX/POSEIDON(T/P), Geosat Follow-On (GFO), ERS-2 и Envisat спутников [для получения альтиметрических данных, так и данных NCEP/NCAR, а также с привлечением результатов натурных (в т.ч. метеорологических и судовых) измерений. по прохождению циклонов (программа была даже расширена за счет включения и циклонов средней барической глубины) за 2002- 2012 годы;
2. Построена электронная база данных (фактически ГИС) об этих циклонах (дата и время, а также направление, с которого пришел циклон, траектория его прохождения над Баренцевым морем и ее нанесение на батиметрическую карту моря, скорость прохождения следа циклона через акваторию моря, атмосферное давление в центре циклона и его изменение по мере прохождения над морем, скорость ветра у поверхности по траектории прохождения циклона, уровень осадков, вариации биомассы фитопланктона и температуры воды у поверхности, а также уровня моря по пути продвижения циклона, и т.д.).

3. На этой основе была получена общая климатологическая картина исследованного нами явления циклонической активности (частотность появления циклонов в течение вегетационного периода; распределение по глубине барического поля и скорости прохождения по акватории Баренцева моря, положение траектории циклона в акватории Баренцева моря).
4. Выявлены ведущие механизмы модуляции поля фитопланктона под действием атмосферных циклонов, проходящих над Баренцевым морем.
5. Произведена оценка значимости исследуемого явления с точки зрения внутригодовой (сезонной) изменчивости уровня первичного продуцирования в Баренцевом море.
6. Осуществлен сравнительный анализ характерных особенностей этого явления, реализующегося в высоких и низких широтах мирового океана.

Получены важнейшие результаты:

1. Окончена обработка всех синергетических спутниковых данных широкого спектрального диапазона (т.е. датчики SeaWiFS, MODIS (Terra & Aqua), QuickSCAT, SSM/I), AMSR-E Aqua [для последующих восстановлений скоростей приводного ветра и температуры поверхности океана]; AMSU-B со спутников серий NOAA [для определения интенсивности осадков, Jason, TOPEX/POSEIDON(T/P), Geosat Follow-On (GFO), ERS-2 и Envisat спутников [для получения альтиметрических данных, так и данных NCEP/NCAR, а также с привлечением результатов натурных (в т.ч. метеорологических и судовых) измерений. по прохождению циклонов (программа была даже расширена за счет включения и циклонов средней барической глубины) за 2002- 2012 годы;
2. Построена электронная база данных (фактически ГИС) об этих циклонах (дата и время, а также направление, с которого пришел циклон, траектория его прохождения над Баренцевым морем и ее нанесение на батиметрическую карту моря, скорость прохождения следа циклона через акваторию моря, атмосферное давление в центре циклона и его изменение по мере прохождения над морем, скорость ветра у поверхности по траектории прохождения циклона, уровень осадков, вариации биомассы фитопланктона и температуры воды у поверхности, а также уровня моря по пути продвижения циклона, и т.д.).
3. На этой основе была получена общая климатологическая картина исследованного нами явления циклонической активности (частотность появления циклонов в течение вегетационного периода; распределение по глубине барического поля и скорости прохождения по акватории Баренцева моря, положение траектории циклона в акватории Баренцева моря).
4. Выявлены ведущие механизмы модуляции поля фитопланктона под действием атмосферных циклонов, проходящих над Баренцевым морем.
5. Произведена оценка значимости исследуемого явления с точки зрения внутригодовой (сезонной) изменчивости уровня первичного продуцирования в Баренцевом море.
6. Осуществлен сравнительный анализ характерных особенностей этого явления, реализующегося в высоких и низких широтах мирового океана.

Методы и подходы, использованные в ходе выполнения проекта:

Алгоритмы восстановления скорости приводного ветра и температуры поверхности океана основаны на использовании данных численного моделирования и применения Нейронных Сетей в качестве оператора решения обратной задачи.

Алгоритм оценки скорости ветра протестирован с использованием независимых измерений морских буев. По сравнению с мировыми аналогами данный алгоритм демонстрирует существенно (в два раза) более высокие точности в условиях оптически плотных атмосфер и штормовых ветров.

Для получения данных в оптическом диапазоне спектра были применены биооптические алгоритмы, разработанные как в НАСА, так и в Нансен-Центре. Большим преимуществом алгоритмов Нансен-Центра - это их способность на основе математических методов многомерной оптимизации и техники нейронных цепей, одновременно определять не только концентрацию хлорофилла фитопланктона (обеспечиваемую алгоритмом НАСА), но и других основных параметров качества природных вод. Эта способность отсутствует у таких операционных биооптических алгоритмов, которыми пользуется NASA или ESA.

Кроме того, ряд специализированных алгоритмов Нансен-Центра позволяют не только выделять области массового вегетирования таких вредных микроводорослей как кокколитофор *Emiliana huxleyi*,

Все выше перечисленные алгоритмы являются оригинальными, подтвердившими свою адекватность, оперативность и высокую точность на примере совмещенных спутниковых и судовых данных. В случае с Баренцевым морем, наличие нашего алгоритма, способного адекватно восстанавливать поля chl, обусловленные *E. huxleyi* представляет особую ценность.

Важнейшей особенностью реализованного методологического подхода является его синергетичность, что позволило при анализе и выявлении ведущих механизмов модуляции поля биомассы фитопланктона комплексно рассматривать/учитывать в каждом конкретном случае совместное действие внешних факторов, состояние морской поверхности, а также вертикальную структуру водного столба (с точки зрения профилей chl и температуры воды). Судя по имеющимся публикациям на данную тему, столь высокая степень комплексности вовлечения в анализ данных различной природы/источников является отличительной чертой настоящего исследования.

СТЕПЕНЬ НОВИЗНЫ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Поскольку данная комплексная работа по сравнению исследуемого эффекта в низких и высоких широтах еще не имеет аналогов, то можно с уверенностью констатировать, что ее результаты находятся на передовых рубежах исследований в этой области. Это касается как методического инструментария \алгоритмов, усиленного синергетического подхода, так и результатов, полученных за отчетные годы.

Достоверность сделанных выводов относительно ведущих факторов, которые определяют тип модуляции биомассы фитопланктона при прохождении циклона, базируется на достаточно большом фактическом материале, полученном нами за десятилетний период. Столь длительный период дистанционных проведенных нами наблюдений выгодно

отличает настоящее исследование от большинства аналогичных исследований для низких широт, которые являются типичными “case studies”. Именно обширный фактический материал позволил нам, во-первых, произвести типизацию эффектов прохождения циклонов в высоких широтах на примере Баренцева моря, во-вторых, выявить механизмы/условия реализации того или иного типа эффекта, получить статистические характеристики циклонической деятельности над Баренцевым морем и показать отсутствие какой-либо очевидной тенденции в частотности и глубине циклонов за прошедшее десятилетие. Это обстоятельство позволило сделать вывод (ранее никем не полученный) о том, что возможное в текущем десятилетии усиление первичного продуцирования в Баренцевом море, обусловленное циклонической деятельностью будет происходить не за счет увеличения числа глубоких медленно перемещающихся циклонов, а за счет увеличения в вегетационный период площади моря, свободной ото льда.

Степень достижения поставленных в проекте целей:

1. Окончена обработка всех синергетических спутниковых данных широкого спектрального диапазона (т.е. датчики SeaWiFS, MODIS (Terra & Aqua), QuickSCAT, SSM/I), AMSR-E Aqua [для последующих восстановлений скоростей приводного ветра и температуры поверхности океана]; AMSU-B со спутников серий NOAA [для определения интенсивности осадков, Jason, TOPEX/POSEIDON(T/P), Geosat Follow-On (GFO), ERS-2 и Envisat спутников [для получения альтиметрических данных, так и данных NCEP/NCAR, а также с привлечением результатов натурных (в т.ч. метеорологических и судовых) измерений. по прохождению циклонов (программа была даже расширена за счет включения и циклонов средней барической глубины) за 2002- 2012 годы;
2. Построена электронная база данных (фактически ГИС) об этих циклонах (дата и время, а также направление, с которого пришел циклон, траектория его прохождения над Баренцевым морем и ее нанесение на батиметрическую карту моря, скорость прохождения следа циклона через акваторию моря, атмосферное давление в центре циклона и его изменение по мере прохождения над морем, скорость ветра у поверхности по траектории прохождения циклона, уровень осадков, вариации биомассы фитопланктона и температуры воды у поверхности, а также уровня моря по пути продвижения циклона, и т.д.). (частично проиллюстрировано в Приложении 1, п. А).
3. На этой основе была получена общая климатологическая картина исследованного нами явления циклонической активности (частотность появления циклонов в течение вегетационного периода; распределение по глубине барического поля и скорости прохождения по акватории

- Баренцева моря, положение траектории циклона в акватории Баренцева моря).(см. Приложение D).
4. Выявлены ведущие механизмы модуляции поля фитопланктона под действием атмосферных циклонов, проходящих над Баренцевым морем.
 5. Произведена оценка значимости исследуемого явления с точки зрения внутригодовой (сезонной) изменчивости уровня первичного продуцирования в Баренцевом море.
 6. Осуществлен сравнительный анализ характерных особенностей этого явления, реализующегося в высоких и низких широтах мирового океана.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Полученные важнейшие результаты

1. Впервые на количественном уровне показано, что явление циклонического влияния на модуляцию продукции фитопланктона в вегетационный период не ограничивается лишь низкими широтами (чему имеются многочисленные литературные свидетельства), но и проявляется в полярных широтах. (Приложение 1, п. Е)
2. В отличие от исследованного многочисленными научными группами явления циклонического влияния на пространственно-временную динамику биомассы фитопланктона в морских и океанических акваториях низких широт (где механизм циклон-обусловленного роста биомассы фитопланктона в большинстве случаев связан с подъемом биоген-обогащенных глубинных вод к поверхности за счет углубления перемешанного слоя (MLD), генерируемого проходящим циклоном), в акватории Баренцева моря указанный выше механизм не является единственным. Баренцево море в гидрологическом отношении является ареной встречи атлантических и арктических вод. Атлантические воды (как более теплые, соленые и продуктивные) формируют (по механизму субдукции) заглубленные водные слои повышенной температуры и повышенной концентрации фитопланктона. При определенной силе проходящего циклона эти слои поднимаются к поверхности, обуславливая, по данным спутниковых измерений, положительный (хотя и необязательно долговременный) рост указанных показателей.

Благодаря высокоширотному расположению акватории Баренцева моря и очень отчетливой динамике развития фитопланктона в пределах вегетационного периода (основной максимум в середине мая- начале июня, вторичный максимум – в августе) [см. Приложение 1, п. С], прохождение циклона вне указанных временных интервалов в температурно-стратифицированных условиях неблагоприятных для развития фитопланктона может и не приводить к заметным модуляциям поля фитопланктона.

Напротив, модуляция поля фитопланктона при прохождении циклона в период его интенсивного развития, происходит на фоне общего роста концентрации хлорофилла и выделение собственно циклон-обусловленного сигнала оказывается затруднительным. Однако сравнение величины концентрации хлорофилла фитопланктона в зоне трека циклона (полоса шириной 200 км) со средним значением концентрации в зоне вне трека

циклона (полоса также шириной 200 км) за тот же период времени показало, что вклад циклона в рост концентрации хлорофилла оказывался на недостоверном статистическом уровне.

Таким образом, на основе полученных данных оказалось возможным выделить три вида влияния циклонов на биомассу фитопланктона в Баренцевом море: 1. падение концентрации хлорофилла, сменяющееся постепенным ростом этого показателя с наступлением пика через 5-7 дней после ухода циклона из акватории моря (эффект, в среднем, длится в течение недели); 2. рост концентрации хлорофилла сразу после прохождения циклона, сменяющийся снижением этого показателя до уровня, предшествовавшего приходу циклона. 3. отсутствие значимой модуляции поля концентрации фитопланктона при прохождении циклона Приложение 16 пп. Е и F)/

3. Реализация указанных типов реакции поля биомассы фитопланктона на прохождение циклона зависит от ряда факторов, среди которых наиболее существенными являются: расположение траектории циклона по акватории моря, прохождения циклона (время в рамках вегетационного периода), а также параметры циклона (барическая глубина, приповерхностная скорость ветра, скорость перемещения циклона по акватории моря), и наконец, фаза NAO. В период положительных значений NAO, динамика по типу 2 оказывается более выраженной, поскольку соответствует ситуациям, когда приток атлантических вод в Баренцево море усиливается.
4. Благодаря получению общей статистической картины по циклонической деятельности над Баренцевым морем за 2003-2012 гг. удалось показать отсутствие какой-либо очевидной тенденции в частотности и глубине циклонов за прошедшее десятилетие (Приложение 16 п. D). Это обстоятельство позволило сделать вывод о том, что возможное в текущем десятилетии усиление первичного продуцирования в Баренцевом море, обусловленное циклонической деятельностью будет происходить не за счет увеличения числа глубоких медленно перемещающихся циклонов, а за счет увеличения в вегетационный период площади моря, свободной ото льда.

Методы и подходы, использованные в ходе выполнения проекта:

Алгоритмы восстановления скорости приводного ветра и температуры поверхности океана основаны на использовании данных численного моделирования и применения Нейронных Сетей в качестве оператора решения обратной задачи.

Алгоритм оценки скорости ветра протестирован с использованием независимых измерений морских буев. По сравнению с мировыми аналогами данный алгоритм демонстрирует существенно (в два раза) более высокие точности в условиях оптически плотных атмосфер и штормовых ветров.

Для получения данных в оптическом диапазоне спектра были применены биооптические алгоритмы, разработанные как в НАСА, так и в Нансен-Центре. Большим преимуществом алгоритмов Нансен-Центра - это их способность на основе математических методов многомерной оптимизации и техники нейронных цепей, одновременно определять не только концентрацию хлорофилла фитопланктона (обеспечиваемую алгоритмом НАСА), но и других основных параметров качества природных вод. Эта способность отсутствует у таких операционных биооптических алгоритмов, которыми пользуется NASA или ESA.

Кроме того, ряд специализированных алгоритмов Нансен-Центра позволяют не только выделять области массового вегетирования таких вредных микроводорослей как кокколитофор *Emiliana huxleyi*,

Все выше перечисленные алгоритмы являются оригинальными, подтвердившими свою адекватность, оперативность и высокую точность на примере совмещенных спутниковых и судовых данных. В случае с Баренцевым морем, наличие нашего алгоритма, способного адекватно восстанавливать поля chl, обусловленные *E. huxleyi* представляет особую ценность.

Важнейшей особенностью реализованного методологического подхода является его синергетичность, что позволило при анализе и выявлении ведущих механизмов модуляции поля биомассы фитопланктона комплексно рассматривать/учитывать в каждом конкретном случае совместное действие внешних факторов, состояние морской поверхности, а также вертикальную структуру водного столба (с точки зрения профилей chl и температуры воды). Судя по имеющимся публикациям на данную тему, столь высокая степень комплексности вовлечения в анализ данных различной природы/источников является отличительной чертой настоящего исследования.

СТЕПЕНЬ НОВИЗНЫ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Степень новизны полученных результатов:

Данные по акватории Баренцева моря являются абсолютно новыми, не имеющими аналога в мировой литературе. Совершенно новым является обнаружение того, что динамика поля поверхностной температуры при прохождении мощных циклонов может существенным образом отличаться для высоких и низких широт, определяясь вертикальной структурой вод (в том числе влиянием динамики поступления атлантических вод в Баренцево море [индикатором чего является знак и величина NAO] и их субдукции, а также полем температуры водной поверхности по периферии следа циклона на поверхности акватории.

Все это оказалось возможным благодаря использованию оригинальных\собственных алгоритмов восстановления параметров как непосредственно характеризующих динамику биофизических полей на морской поверхности, так и важнейшие параметры внешнего физического воздействия.

Расширенный синергетический подход к исследованию этого явления позволил с полной достоверностью выявить ведущие факторы, определяющие характер/тип влияния циклонической деятельности на динамику первичного продуцирования в зонах прохождения циклонов. Выведено многомерное регрессионное соотношение, связывающее увеличение концентрации хлорофилла фитопланктона с влиянием глубины циклона и скоростью его перемещения вдоль своей траектории. Установлены характерные длительности периодов вариаций биомассы фитопланктона при реализации типов 1 и 2 влияния циклонов в Баренцевом море.

Важным результатом является и получение климатологических данных по частотности прохождения циклонов по акватории Баренцева моря за вегетационный период за 2003-2012 годы (для всех циклонов, глубоких и неглубоких циклонов, циклонов разной скорости перемещения по акватории моря и разными скоростями приводного ветра, вызываемыми этими циклонами). Эти данные использованы для оценки возможных тенденций в модуляции полей биомассы фитопланктона в Баренцевом море в последующие годы в условиях неуклонного потепления климата в арктических и северо-атлантических широтах: возможное в текущем десятилетии усиление первичного продуцирования в Баренцевом

море, обусловленное циклонической деятельностью будет происходить не за счет увеличения числа глубоких медленно перемещающихся циклонов, а за счет увеличения в вегетационный период площади моря, свободной ото льда.

Сопоставление полученных результатов с мировым уровнем:

Поскольку данная комплексная работа по сравнению исследуемого эффекта в низких и высоких широтах еще не имеет аналогов, то можно с уверенностью констатировать, что ее результаты находятся на передовых рубежах исследований в этой области. Это касается как методического инструментария \алгоритмов, так и результатов, полученных за отчетные годы.

Достоверность сделанных выводов относительно ведущих факторов, которые определяют тип модуляции биомассы фитопланктона при прохождении циклона, базируется на достаточно большом фактическом материале, полученном нами за десятилетний период. Столь длительный период дистанционных проведенных нами наблюдений выгодно отличает настоящее исследование от большинства аналогичных исследований для низких широт, которые являются типичными “case studies”. Именно обширный фактический материал позволил нам, во-первых, произвести типизацию эффектов прохождения циклонов в высоких широтах на примере Баренцева моря, и во-вторых, выявить механизмы/условия реализации того или иного типа эффекта (см. Приложение 1б п. G).

В целом можно констатировать, что картина по Баренцево морю в рамках реакции типа 1 первичного продуцирования нахождение циклона полностью укладывается в те закономерности, которые были получены для низких широт, однако отличаются по интенсивности эффектов и длительности их фаз.

Выявление реакции типа 2 является принципиально новым вкладом в понимание спектра физических механизмов, лежащих в основе изучаемого явления. Есть все основания предполагать, что реакция типа два реализуется не только в Баренцевом море, но и в других морях Северного Ледовитого Океана, где имеет место субдукция атлантических вод.

Сравнивая наши результаты с результатами аналогичных исследований, полученными в низких широтах нашими китайскими коллегами, а также другими исследователями, можно констатировать следующие наиболее существенные отличительные черты:

2. в Баренцевом море существует (в дополнение к уже известным) механизмам воздействия циклона на БФ не сообщавшийся в опубликованных работах по низким широтам (связанный с субдукцией атлантических вод, поступающих в Баренцево море).

2. Продолжительность периода возрастания БФ в Баренцевом море. как правило, не превышает 1 недели, тогда как в низких широтах она может составлять несколько недель, вплоть до месяца.

4. Уровень влияния циклона на первичное продуцирование в Баренцевом море в ряде случаев вполне сравним с аналогичными оценками для ряда акваторий нижних широт, хотя при этом сообщаются и случаи, когда годовая первичная продуктивность существенно возрастала (30-60%; 90%; в 2-3 раза, и даже в 60 раз!)

НАУЧНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ

Количество научных работ, опубликованных в ходе выполнения проекта:

4

Из них включенных в перечень ВАК:

0

Из них включенных в системы цитирования:

4

Количество научных работ, подготовленных в ходе выполнения проекта и принятых к печати в 2013 г.:

4

Адреса ресурсов в Internet, подготовленных авторами по данному проекту:

<http://ceclones.niersc.spb.ru>

Библиографический список совместных публикаций (в соавторстве с зарубежным партнером) по проекту за весь период выполнения проекта, предшествующий данному отчету в порядке значимости: монографии, статьи в научных журналах и т.д.:

1. Книга/Book:

Typhoon Impacts and Crisis Management (Editors, Danling Tang, GuangJun Sui, Gad Lave, Tony Song, Adam D. Switzer, Dmitry Pozdnyakov). Publisher: Springer 2014,

Chapters:

Leonid Bobylev, Danling Tang, Dmitry Pozdnyakov, Elizaveta Zabolotskikh, Pavel Golubkin, Dmitry Petrenko, Evgeny Morozov. A pilot satellite-based investigation of the impact of a deep polar cyclone propagation on the phytoplankton chlorophyll spatial and temporal dynamics in the Arctic Ocean. PP. 283- 310.

Sufen Wang, DanLing TANG, Dmitry Pozdnyakov, Gang Pan. T typhoon-induced ocean surface Chl-a blooms. PP. 165- 181.

Zabolotskikh, E. V. , Mitnik, L. M., Bobylev, L.P. Chapron, B. Satellite passive and active microwave methods for Arctic cyclone studies. PP. 201-211.

Статья в рецензируемом журнале/PAPER IN A REFEREED JOURNAL (импакт-фактор 1.183):

YE. HaiJun, TANG, DanLing, Jayasinghe, R.P.P.K., Pozdnyakov Dmitry. 2014. Spatial-temporal variability of phytoplankton size classes in the South China Sea observed from in space and in situ, *Advances in Space Research* (принято к опубликованию находится в печати, ожидаемый срок опубликования – 2014 г./accepted for publication, In press to appear in 2014)

УЧАСТИЕ В КОНФЕРЕНЦИЯХ И ЭКСПЕДИЦИЯХ:

Участие в международных научных мероприятиях по теме проекта, которые проводились при финансовой поддержке РФФИ:

0

Участие в экспедициях по тематике проекта, проводимых при финансовой поддержке РФФИ:

0

ФИНАНСИРОВАНИЕ И ОБОРУДОВАНИЕ:

Финансовые средства, полученные от РФФИ:

1000000 руб

Приоритетное направление развития науки, технологий и техники РФ, которому, по мнению исполнителей, соответствуют результаты данного проекта:

4- Науки о жизни

Критическая технология РФ, в которой, по мнению исполнителей, соответствуют результаты данного проекта:

19 – Технологии мониторинга и прогнозирования

Основное направление технологической модернизации экономики России, которому, по мнению исполнителей, соответствуют результаты данного проекта:

3- космические технологии

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ПРИЛОЖЕНИЕ 2.

НАУЧНО-ПОПУЛЯРНОЕ ИЗЛОЖЕНИЕ

Глобальное изменение климата является в наше время общепринятым фактом. Влияние этого изменения проявляется весьма разнообразно и специфично для различных регионов и широтных зон.

Выясняется, в частности, что, по крайней мере в низких/близких к экватору широтах происходящие климатические сдвиги обуславливают усиление циклонической деятельности и рост числа мощных циклонов. При этом обнаружено, что такие циклоны, проходя по морским/океаническим акваториям с низкой биологической активностью, в так называемых «биологических пустынях» (а это, как правило, глубоководные, удаленные от береговой полосы районы), обуславливают там увеличение биомассы микроводорослей (фитопланктона). Поскольку фитопланктон является «первичным кормовым материалом» для развития всей цепочки (от низших до высших форм) живых организмов в водной среде, то увеличение биомассы фитопланктона способно приводить к росту продуктивности упомянутых выше морских/океанических районов, и как следствие, в известной мере, перестройке их экосистемы.

Примечательно, что в действительности, оказывается, что циклон-обусловленное увеличение первичной продуктивности имеет место не только в отдаленных, биологически бедных морских районах, но и в акваториях более высокой биологической активности.

Существуют научно-обоснованные ожидания, что с продолжающимся потеплением глобального климата, число мощных циклонов, по крайней мере в низких широтах, будет неуклонно возрастать. А следовательно, следует ожидать, что значение обсуждаемого эффекта усиления биологической активности в океанических и морских акваториях будет все более существенным.

До сих пор, однако, шла речь о морских экосистемах низких широт. Исследований подобного рода для высоких широт не производилось. Между тем упомянутое потепление климата наиболее существенным образом проявляется именно на высоких широтах обоих полушарий. В частности, именно в Северном Ледовитом Океане за последние десятилетия

регистрируются прямо-таки драматические снижения многолетнего льда с перспективой ко второй половине нынешнего столетия полного освобождения этого океана в летний период от ледового покрова!

В свете происходящих высокоширотных климатических изменений и увеличения свободной ото льда поверхности океана, естественно возникает вопрос о том, как это сказывается на состоянии динамики продуктивности Северного Ледовитого Океана в наше время, и что можно ожидать в будущем. Именно этим вопросам и посвящен данный проект. Выполненный совместно российскими и китайскими учеными, он ставит задачу на основе сравнительного анализа выявить и на количественном уровне изучить общие и отличительные черты обсуждаемого явления, реализующегося в широтно-контрастных зонах на примере Баренцева и Южно-Китайского морей.

В течение 2003-2012 гг. нами с привлечением спутниковой информации было выявлено более 90 циклонов, которые прошли над акваторией Баренцева моря с марта по сентябрь, т.е. период, включающий в себя и основные месяцы развития фитопланктона [так называемый вегетационный период, длящийся в Баренцевом море в среднем с начала апреля по конец августа]. Значительно отличаясь по своей силе, т.е. глубине падения давления в центре, [оказалось, что численность и тех и других разделилась практически поровну], выявленные циклоны обнаружили существенную межгодовую и сезонную неоднородность появления над Баренцевым морем. Наибольшее число, например, сильных циклонов отмечалось в 2005, 2007, 2009 гг., а в пределах вегетационного периода 29% в апреле, 17% в мае, 12% в июне, 13% в июле и 29% в августе. Учитывая, что основной и вторичный максимумы развития фитопланктона в Баренцевом море статистически приходятся на май и август, можно видеть, что наиболее интенсивная циклоническая деятельность приходится на заключительный этап вегетационного периода.

Исследование влияния обнаруженных циклонов на ход развития фитопланктона выявило три основных типа: 1. биомасса фитопланктона (БФ) в поверхностных слоях и температура поверхности воды (ТПВ) снижались непосредственно сразу после прохождения циклона, а затем (на четвертый-пятый, день) обнаруживали рост, длящийся, как правило, не менее 5-6 дней; 2. БФ и ТПВ возрастали непосредственно (в большинстве случаев – на второй день) после того, как циклон покидал акваторию моря, а затем довольно быстро снижались, и наконец, 3. когда по спутниковым данным не обнаружилось каких-либо изменений полей БФ и ТПВ в результате прохождения циклона.

Наибольший интерес в рамках настоящего исследования представляли случаи из категории 1, когда имело место достаточно длительное увеличение БФ вдоль траектории циклона. Выяснилось, что за весь десятилетний период наших наблюдений лишь около 15 циклонов соответствовали этому критерию. При этом возрастание БФ (относительно состояния, предшествующего приходу циклона) по траектории перемещения циклона оказывалось на уровне порядка 0.2 мг/л (индикатором здесь служила концентрация основного пигмента фитопланктона- хлорофилла –а).

Указанное повышение происходило в пределах площади, ограниченной полосой шириной 200 км и длиной траектории циклона, которая существенно варьировала.

Расчеты показывают, что при достаточно протяженных траекториях, площадь полосы возрастания БФ относительно общей площади развития фитопланктона по акватории на момент прохождения циклона над Баренцевым морем могла в среднем составлять 14%. Соответственно в аналогичном соотношении находился и эффект увеличения БФ.

Сравнивая наши результаты с результатами аналогичных исследований, полученными в низких широтах нашими китайскими коллегами, а также другими исследователями, можно констатировать следующие наиболее существенные отличительные черты:

3. в Баренцевом море существует (в дополнение к уже известным) механизм воздействия циклона на БФ не сообщавшийся в опубликованных работах по низким широтам (связанный с субдукцией атлантических вод, поступающих в Баренцево море).
2. Продолжительность периода возрастания БФ в Баренцевом море, как правило, не превышает 1 недели, тогда как в низких широтах она может составлять несколько недель, вплоть до месяца.

5. Уровень влияния циклона на первичное продуцирование в Баренцевом море в ряде случаев вполне сравним с аналогичными оценками для ряда акваторий нижних широт, хотя при этом сообщаются и случаи, когда годовая первичная продуктивность существенно возрастала (30-60%; 90%; в 2-3 раза, и даже в 60 раз !)

Таким образом, на основе проведенного нами исследования, можно констатировать, что увеличение БФ в акватории Баренцева моря в результате циклонической деятельности имеет 1. существенно локальный характер, 2. низкий уровень повторяемости, и 3. степень влияния на общий уровень первичного продуцирования в этом морском районе за вегетационный период достаточно низка.

К этому следует добавить, что полученная нами статистические характеристики циклонов в Баренцевом море за предшествующий десятилетний период не дает никаких оснований предполагать, что с продолжающимся потеплением климата в Арктике, по крайней мере в вегетационный период, будет происходить рост числа циклонов в этом регионе. Это обстоятельство позволило сделать вывод о том, что возможное в текущем десятилетии усиление первичного продуцирования в Баренцевом море, обусловленное циклонической деятельностью будет происходить не за счет увеличения числа глубоких медленно перемещающихся циклонов, а за счет увеличения в вегетационный период площади моря, свободной ото льда.

ПРИЛОЖЕНИЕ 3.

Аннотации публикаций в монографии *Typhoon Impacts and Crisis Management* (Editors, Danling Tang, GuangJun Sui, Gad Lave, Tony Song, Adam D. Switzer, Dmitry Pozdnyakov). Publisher: Springer 2014:

1. Leonid Bobylev, Danling Tang, Dmitry Pozdnyakov, Elizaveta Zabolotskikh, Pavel Golubkin, Dmitry Petrenko, Evgeny Morozov. A pilot satellite-based investigation of the impact of a deep polar cyclone propagation on the phytoplankton chlorophyll spatial and temporal dynamics in the Arctic Ocean. PP. 283- 310.

Пилотное исследование (прежде всего на основе спутниковой информации) модуляций поля биомассы фитопланктона в пределах слоя перемешивания под воздействием проходящих циклонов было выполнено впервые для высоких широт северного полушария в пределах акватории Северного Ледовитого Океана. Используя синергетический подход, высокоширотные циклоны идентифицировались по данным NCEP/NCAR для летнего периода 2002-2005 гг., и определялись из траектории по акватории Баренцева моря. Скорость ветра у поверхности восстанавливалась из спутниковых данных QuikSCAT. Эти данные

синергетически комплексовались с данными спутниковых датчиков цвета океана - SeaWiFS и MODIS с целью изучения пространственно-временной динамики распределения концентрации хлорофилла фитопланктона в поверхностных слоях моря по траектории передвижения циклона. В тех случаях, когда барическая глубина циклона, скорость приповерхностного ветра, положение траектории циклона в батиметрическом пространстве, а также состояние облачного покрова совместно оказывались благоприятными, отчетливо наблюдалось возрастание концентрации хлорофилла фитопланктона по пути следования циклона в Баренцевом море -достаточно олиготрофном водоеме. В большинстве изученных случаев возрастание концентрации концентрации хлорофилла наступало на 5 день после прохождения циклона. Полученный результат может свидетельствовать, что в условиях продолжающегося потепления арктического климата и неуклонного роста в летний период площади водной поверхности, свободной ото льда, эффект усиления первичного продуцирования в Баренцевом море (и, по-видимому, по всему Арктическому бассейну) вполне ожидаем. Однако требуется значительное расширение рядов данных для установления действительного знака и величины обсуждаемой тенденции и выявления конкретных механизмов воздействия циклонов на первичное продуцирование в Баренцевом море

2. Sufen Wang, DanLing TANG, Dmitry Pozdnyakov, Gang Pan. Typhoon-induced ocean surface Chl-a blooms. PP. 165- 181.

Исследовались цветения фитопланктона (по значениям концентрации хлорофилла) в поверхностных водах Южно-Китайского моря, обусловленные прохождением циклонов над акваторией этого моря. Было выявлено, что в пелагиальных районах моря при прохождении глубокого циклона происходит быстрое поднятие более холодных глубинных вод по механизму экмановского насоса. В результате температура поверхности воды во траектории движения циклона снижалась на 2-3 градуса Цельсия. Через несколько дней в районе поднятия глубинных вод возникали цветения фитопланктона как следствие прихода к поверхности биогенов с глубинными водами. Возрастание концентрации хлорофилла фитопланктона оказывалось в положительной связи с силой циклона и отрицательной связи со скоростью передвижения циклона по акватории моря. Это возрастание оказывалось меньше и в тех случаях, если траектория пересекала вихревую структуру уже обусловившую снижение поверхностной температуры воды.

В целом, учитывая климатологию циклонической деятельности в исследуемой акватории, можно утверждать, что в годовом исчислении первичной продукции роль циклонов в ее усилении довольно значительна, хотя и варьирует от года к году (в пределах 5- 35%).

3. Zabolotskikh, E. V. , Mitnik, L. M., Bobylev, L.P. Chapron, B. Satellite passive and active microwave methods for Arctic cyclone studies. PP. 201-211.

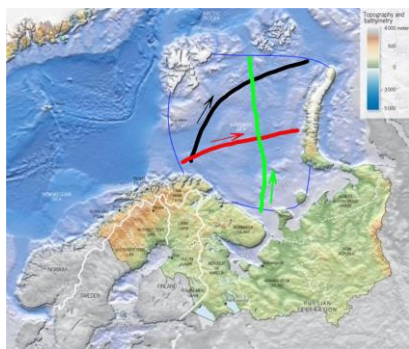
Рассмотрены спутниковые пассивные методы для исследования арктических циклонов. Показано, что данные, получаемые со специального микроволнового датчика изображений (SSM/I), установленного на борту спутников в рамках программы военного предназначения (DMSP), а также усовершенствованных микроволновых радиометров в рамках системы наблюдения Земли (AMSR-E) на борту спутника Aqua и AMSR2 на борту спутника GCOM-W оказываются высокоинформативными для целей исследования полярных регионов. Описана методология обнаружения и отслеживания траекторий полярных циклонов, получивших название Polar Lows. Приведены конкретные примеры исследования мезомасштабных барических образований с применением описанных методик к пассивным микроволновым данным и данным других спектральных диапазонов (видимый, инфракрасный), а также данных изображений с радаров с синтезированной апертурой и скаттерометров (для численной оценки скорости ветра).

Аннотация публикации в журнале:

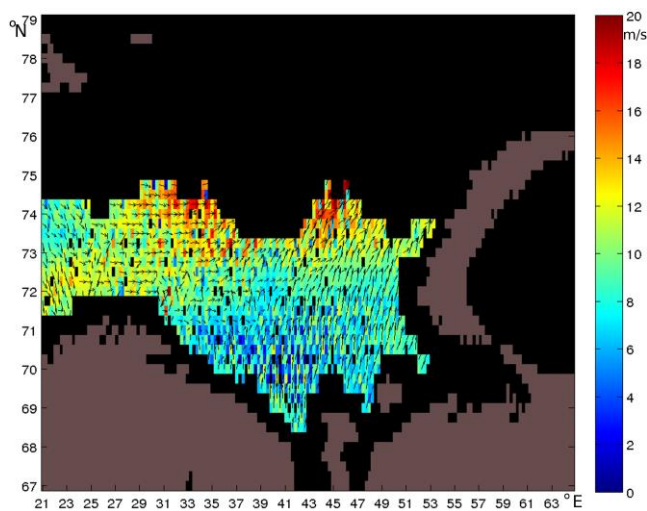
YE. HaiJun, TANG, DanLing, Jayasinghe, R.P.P.K., Pozdnyakov Dmitry. 2014. Spatial-temporal variability of phytoplankton size classes in the South China Sea observed from in space and in situ, *Advances in Space Research* (в печати)

В настоящем исследовании используется ранее созданная 3-х компонентная модель (ТСМ-УТ) для определения классов клеток фитопланктона по их размерам по спутниковым данным по концентрации хлорофилла фитопланктона, обитающего Южно-Китайском море. Исследовался период с 1998 по 2007 годы. Было выявлено, что: в пространственной структуре фитокомплекса доминирует пикопланктон в пелагиали и микропланктон в прибрежной зоне. В сезонной динамике высокие концентрации пикопланктона характерны для мая-июня, в то время как микропланктон превалирует в декабре-январе. В открытой части моря это наиболее ярко проявилось с явлением Эль-Ниньо 1998 г. Оказалось также, что численность обоих классов фитопланктона находится в обратной корреляции с температурой поверхности воды и индексом Ниньо 3.4, но в положительной корреляционной зависимости со скоростью приповерхностного ветра.

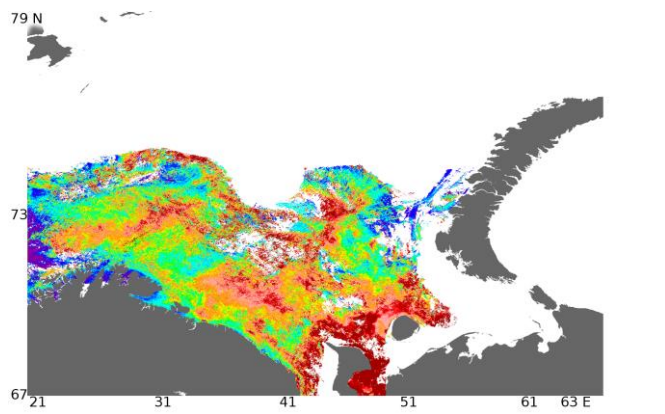
Рисунки.



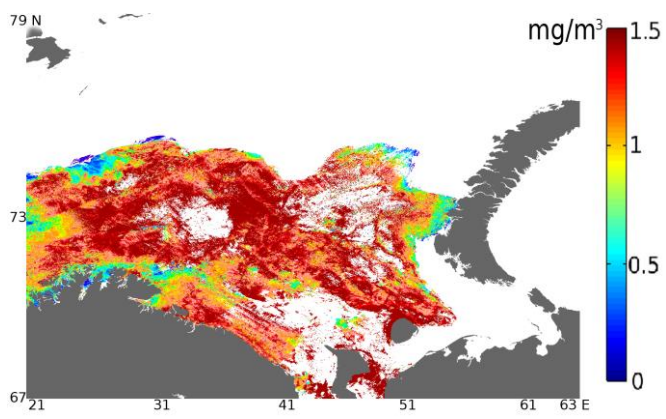
Примеры траекторий циклонов по акватории Баренцева моря в вегетационный период



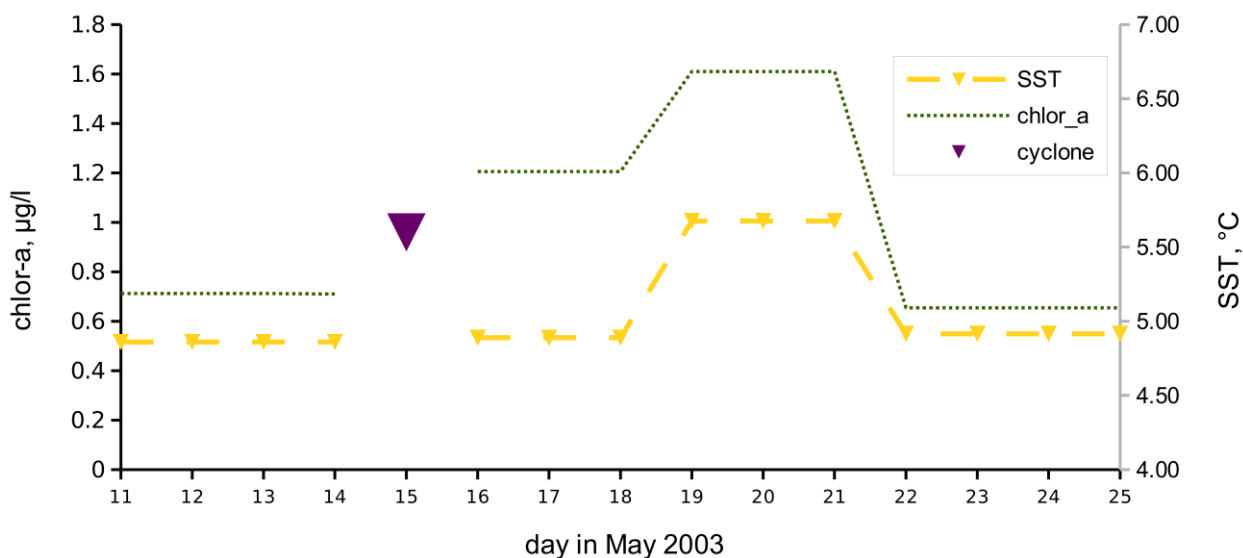
Изменение температуры поверхности воды вдоль траектории циклона (красная линия на предыдущем рисунке, май 2003г.)



Поле концентрации хлорофилла фитопланктона в поверхностных водах за пять дней до прохождения циклона (красная линия на первом рисунке)



Поле концентрации хлорофилла фитопланктона в поверхностных водах через пять дней после прохождения циклона (красная линия на первом рисунке)



Изменения температуры поверхности воды и концентрации хлорофилла фитопланктона по траектории циклона в мае 2003 г.