ОКЕАНОЛОГИЯ

УДК 004.6:[551.46.09:639.22](261)(265) doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-493-514

Применение идеологии больших данных к анализу дальних связей и прогнозированию состояния промысловых районов в Атлантическом и Тихом океанах

О.Ю. Краснобородько

Атлантический филиал ФГБНУ «ВНИРО» («АтлантНИРО»), г. Калининград,
sea@atlantniro.ru

Феномен дальних связей в глобальной геоэкосистеме определяет ее состояния и позволяет прогнозировать их. В рамках идеологии больших данных за период 1982—2020 гг. выполнен расчет асинхронных корреляционных связей помесячных временных рядов данных дистанционного зондирования Земли (атмосферного давления, температуры поверхности океана, концентрации хлорофилла, интенсивности промысла) в узлах глобальной сети 1×1°. Для районов промысла в Атлантике и в Юго-Восточной части Тихого океана по каждому виду данных выделены районы дальних связей, объединяющие множества связанных с ними узлов, описаны их статистические показатели. Показана возможность прогнозирования состояния промысловых районов простыми регрессионными зависимостями.

Ключевые слова: большие данные, геоэкосистемы, дальние связи, условия среды, промысел, корреляция, регрессия, прогноз.

The application of big data ideology to the analysis of teleconnections and forecasting of the fishery regions condition in the Atlantic and Pacific oceans

O.Yu. Krasnoborodko

Atlantic branch of «VNIRO» («AtlantNIRO»), Kaliningrad, Russia

Improvement of the methods of forecasting the state of pelagic fishing areas is one of priority tasks of marine geoecology, which is partly solved by using statistically valid teleconnection indices. In recent years, due to the increased remote sensing data volume within the ideology of big data, a massive search and analysis of new and verification of known teleconnections are carried out. For the fishing areas in the Atlantic and Pacific Oceans, through all combinations of monthly data series between 1° node of the global data grid for atmospheric pressure (NOAA), ocean surface temperature (IGOSS), chlorophyll concentration (MODIS), and fishing effort (GlobalFishingWatch), the calculation of asynchronous correlations and their linear regressions has been carried out. There have been revealed about 730 thousand significant correlations between 1° node in fishing areas and nodes in remote ocean regions, which have a circumglobal character. The largest number of connections has been revealed for the regional (0—2 thousand km) and interregional (12—14 thousand km) scales. A large number of teleconnection regions has been noted in the northern hemisphere, where the large energy zones in the "ocean—atmosphere" system operate. The largest number of connections has been found for the time series shifts of 8—12 months. An analysis of the stability of the revealed teleconnections shows that the minimum length of rows that give a stable number of connections is 15—16 years. Most of the identified teleconnections have their analogs in the known climatic indices, but they detail their functioning in seasons and space.

Keywords: big data, geoecosystems, teleconnections, environmental conditions, fishery, correlation, regression, forecast.

For citation: *O.Yu. Krasnoborodko*. The application of big data ideology to the analysis of teleconnections and forecasting of the fishery regions condition in the Atlantic and Pacific oceans. *Gidrometeorologiya i Ekologiya*. Hydrometeorology and Ecology. 2021, 64: 493—514. [In Russian]. doi: 10.33933/2713-3001-2021-64-493-514.

Введение

Природно-антропогенные геоэкосистемы — это географические оболочки Земли, подверженные значительному влиянию человеческой деятельности, в результате которой меняются механизмы их функционирования. Трансформация природных геоэкосистем в природно-антропогенные идет повсеместно, в том числе и в Мировом океане вследствие развития в нем широкомасштабного промысла водных биологических ресурсов (ВБР). По объемам добычи ВБР первое место занимает эпи- и мезопелагический океанический промысел в верхней толще океана (0—1000 м), дающий до 85 % валового объема уловов [1]. В связи с этим одной из важнейших задач промысловой океанологии и морской геоэкологии является совершенствование научных основ прогнозирования состояния районов пелагического промысла ВБР [2].

Известно, что изменения состояния геоэкосистем в одних районах океана с некоторыми временными лагами отзываются сходными изменениями в других районах, в том числе удаленных на тысячи километров. Этот феномен носит название дальних связей (ДС) и характерен для многих районов Мирового океана. ДС стали выявляться на заре становления океанологии и являлись результатом многочисленных натурных наблюдений за изменениями условий среды, позже было проведено их математическое обоснование [3]. Статистически обоснованные ДС легли в основу гидрометеорологических индексов, используемых сейчас — Северо-Атлантическое колебание (САК), Арктическое колебание (АК), Эль-Ниньо — Южное колебание (ЭНЮК), Антарктическое колебание (ААК) и др. (рис. 1). Они связывают как комбинации, так и отдельные параметры глобальной геоэкосистемы — атмосферное давление, влажность, температуру воздуха, температуру поверхности океана (ТПО), концентрацию CO_2, параметры продуктивности вод, величины биомассы ВБР и многие другие. ДС могут иметь в основе как прямую (положительную), так и обратную (отрицательную) связь параметров. Выделяют несколько типов ДС [3—5]:

— «атмосфера—океан» — например, ЭНЮК;

— «атмосфера—атмосфера» — САК, АК, Восточно-Атлантическая ДС (ВА), ААК, Западно-Тихоокеанская (ЗТ), Восточно-Атлантическая — Западно-Европейская (ВА/ЗР), тропическая ДС Северного полушария (ТСП);

— «океан—океан» — Атлантическая многодекадная осцилляция (АМО), Тихоокеанская декадная осцилляция (ТДО), Тропическая, Западно- и Восточно-Индийская осцилляции (ТИО, ЗИО, ВИО), Тропическая Южно-Атлантическая осцилляция (ТЮА), термические индексы Тихого океана (NINO 1—4), осцилляция Северо-Тихоокеанских круговоротов (ОСТК);

— «суша—атмосфера» — Скандинавская ДС (СКАНД), Тихоокеанская Северо-Американская ДС (ТСА);

— «суша—океан» — Полярно-Европейская ДС (ПОЛ/ЕВР).

На современном этапе развития промысловой океанологии и морской геоэкологии в рамках решения задач поиска и анализа ДС применяется широкий спектр математических методов [6, 7]: корреляционный, многомерный статистический, вейвлет-анализ, нейронные сети, марковские цепи. В рамках этих методов на базе данных т.н. климатических сетей (в англ. лит. «Climate Network» — глобальные регулярные сетки данных параметров атмосферы и океана — атмосферного давления, концентрации CO_2, ТПО и др.) проводят массовые расчеты и поиск различных статистических показателей, характеризующих ДС между районами глобальной геоэкосистемы [8—11]. Практическая значимость таких работ заключается в возможности повышения качества прогнозов состояния геоэкосистем и ВБР. Наиболее интересны следующие:

— ДС с временными лагами от месяца до года—двух лет. Они позволяют прогнозировать состояния гидрометеорологических полей и ВБР в среднесрочном масштабе для оптимизации расстановки промыслового флота;

— Комплексные ДС в системе «атмосфера — океан — продуктивность вод — промысел». Несмотря на большой объем имеющихся сегодня данных и возможностей их обработки, такие ДС для промысловых районов все еще недостаточно описаны, их поиск остается трудной задачей. Вовлечение в анализ новых объемов данных повышает требования к вычислительным мощностям,

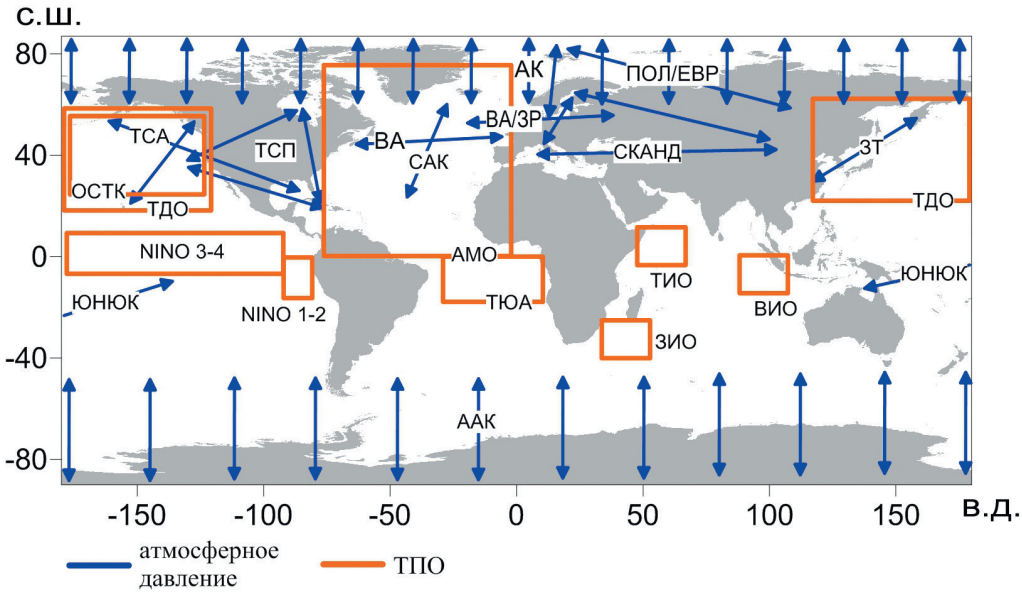

Рис. 1. Дальние связи в атмосфере и океане (расшифровка аббревиатур в тексте, по [3—5]).

Fig. 1. Teleconnections in the atmosphere and ocean (abbreviations in the text, after [3—5]).

а накопление новых переменных в уравнениях регрессии приводит к снижению силы итоговых ДС.

Корреляционный анализ – распространенный с начала XX в. метод исследования климата и механизмов взаимодействия между климатическими процессами (Walker, 1923, 1924; Lanzante, 1996; Klein, 1999; Von Storch, 2002; Chatfield, 2003; Hashizume, 2009, Gu, Adler, 2011 и др. — см. обзор в [12]). В его рамках были получены важные результаты, касающиеся временных лагов корреляций ТПО между тропическими регионами океанов, механизмов влияния Эль-Ниньо на Мировой океан, исследовано взаимное влияние климатических процессов в Атлантике и в Европе, получены их регрессионные зависимости. Однако эти исследования поставили и ряд вопросов: какова истинная природа выявляемых корреляций и их временных лагов — физическая или статистическая? Почему климатологические ряды часто показывают корреляции (автокорреляции) со свойствами «красного» шума (энергия колебаний выше на низких частотах)? Была выработана идея двухэтапного подхода к их анализу: на первом этапе для обнаружения причинности используются различные графические модели [12,13], на втором рассчитывается мера регрессии, позволяющая оценить силу взаимодействия.

Современные технологии получения регулярных данных дистанционного зондирования Земли (ДДЗ) позволили с высокой скоростью пополнять глобальные массивы данных сверхвысокого разрешения (до 1×1 км). Ежедневный объем спутниковых ДДЗ к 2017 г. достиг 4,5 Тб и продолжает расти [14]. Большие объемы данных, разнообразие измерительных устройств и видов информации, высокая скорость ее поступления наряду с высокими требованиями к вычислительным мощностям в процессе извлечения ее ценной составляющей, являются основными качествами т.н. «больших данных» (БД, в англ. лит. «Big Data») [15]. Термин БД также применяется к процессам генерации больших объемов вторичных данных, возникающих в процессе обработки исходных данных, изначально не относящихся к категории БД. В данной статье рассматриваются вторичные БД, возникающие в результате комбинаторных операций между ДДЗ в узлах регулярной сетки, изначально имеющей невысокое пространственно-временное разрешение — 1×1°, 1 месяц (рис. 2). В основе идеологии БД лежат принципы простой, быстрой, эффективной автоматической обработки для извлечения из них полезной информации в проблемных областях [16]. Одной из таких областей является анализ функционирования глобальной геоэкосистемы Земли. Актуальной современной задачей является вовлечение БД ДДЗ в процесс верификации известных и поиска новых ДС.

БД создают существенные технические трудности для применения многоэтапных подходов глубокого анализа и интерпретации результатов массовых корреляций на регулярных сетках, насчитывающих десятки тысяч узлов и миллиарды их комбинаций. В частности, сложно поддаются автоматизации и увеличивают требуемые вычислительные мощности графические модели анализа причинности во временных рядах [12, 13]. Вместе с тем, идеология БД, которую можно выразить формулой «глубина в обмен на охват», дает и ряд преимуществ — в объеме анализируемых данных, их пространственно-временном разрешении и охвате. Важен баланс между двумя подходами.

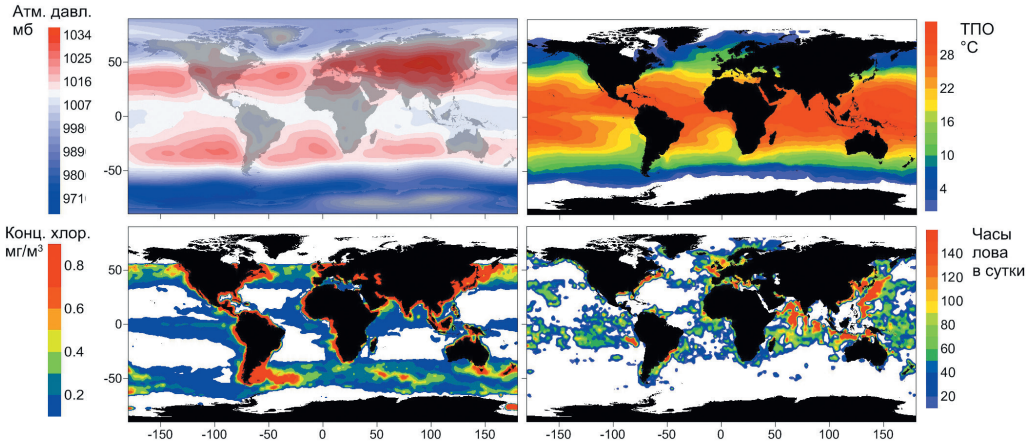

Рис. 2. Основные виды глобальных данных дистанционного зондирования Земли (ноябрь 2020 г.).

Fig. 2. The main types of the global remote sensing data (November 2020).

Цель данной работы — на основе ДДЗ с применением программных технологий автоматизации обработки БД уточнить конфигурацию известных и выполнить поиск новых районов ДС для улучшения качества прогнозирования состояния геоэкосистем в действующих и перспективных районах российского экспедиционного промысла ВБР в Атлантическом океане и в Юго-Восточной части Тихого океана. В работе рассматриваются районы Северо-Восточной Атлантики (СВА), Центрально-Восточной Атлантики (ЦВА), Антарктической части Атлантики (АчА), Юго-Восточной части Тихого океана (ЮВТО).

Научная новизна работы заключается в геоэкологическом подходе к выбору комбинации исходных данных для анализа, которые комплексно охватывают промыслово-океанологические системы на всех уровнях их организации — от атмосферы до промысла, а также в объеме проанализированных вторичных БД, сгенерированных в ходе комбинаторных операций с ДДЗ.

Материалы и методы

Анализировались среднемесячные массивы ДДЗ из следующих источников:

— атмосферное давление на уровне моря NOAA NCEP (39 лет, с января 1982 г. по декабрь 2020 г.) [17];

— ТПО IGOSS Reyn_SmithOIv2 (39 лет, 1982—2020 гг.) [18];

— концентрация хлорофилла MODIS (18 лет, 2003—2020 гг.) [19];

— часы лова GlobalFishingWatch (9 лет, 2012—2020 гг.) [20].

Предобработка исходных данных заключалась в их интерполяции методом Kriging в среде Golden Software Surfer 13 на глобальную сетку с разрешением 1×1° и 1 месяц и формировании в ее узлах четырех наборов данных (по давлению, ТПО, хлорофиллу, часам лова) из 12 временных рядов, содержащих одинаковые

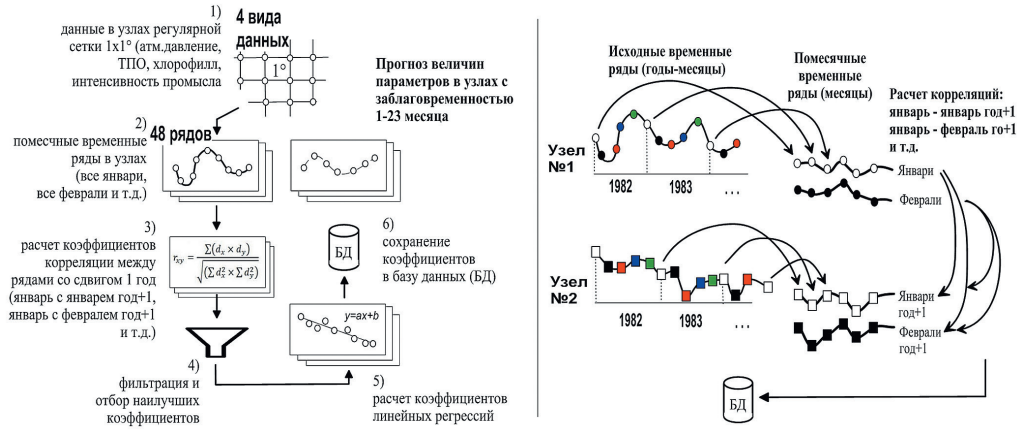

Рис. 3. Этапы обработки временных рядов гидрометеорологических характеристик в узлах регулярной сетки.

Fig. 3. Stages of processing of time series of the hydrometeorological characteristics on the regular grid.

месяцы (ряд 1 — все январи по давлению, ряд 2 — все феврали и т.д.). Таким образом, для каждого узла были получены 48 временных рядов длиной от 9 до 39 значений в зависимости от временного охвата соответствующего вида данных (рис. 3). Общее количество временных рядов, подготовленных к дальнейшему анализу в рамках глобальной регулярной сетки, составило 3,1 млн.

Основные расчеты выполнялись авторским программным обеспечением в среде Microsoft Visual Basic. Для каждого вида данных методом перебора всех возможных комбинаций помесячных временных рядов между 1° узлами глобальной сетки и узлами в районах промысла (СВА, ЦВА, АчА, ЮВТО) выполнялся расчет асинхронных коэффициентов корреляции со сдвигами рядов относительно друг друга на год (ряд для январей предыдущего года коррелировался с рядом для январей последующего года, ряд для январей предыдущего года — с рядом для февралей последующего года и т.д.) Таким образом, временной сдвиг между параметрами изменялся от 1 до 23 месяцев (сдвиг на 1 месяц — ряд для декабрей предыдущего года — ряд для январей последующего года, сдвиг на 23 месяца — ряд для январей предыдущего года — ряд для декабрей последующего года, см. рис. 3). Данный алгоритм позволил осуществить последовательный перебор всех возможных сдвигов временных рядов друг относительно друга, общее количество которых для каждой пары узлов по одному виду данных ДДЗ составило 144. Сходство рядов оценивалось коэффициентами корреляции Пирсона. Высокие их значения, свидетельствующие о наличии связей узлов, рассматривались как признак возможного наличия ДС.

Далее была осуществлена процедура фильтрации и отбора наилучших коэффициентов корреляции (далее — значимых). Эмпирическим путем были подобраны пороговые величины, ниже которых рассчитанные коэффициенты корреляции отфильтровывались и не участвовали в дальнейших расчетах. Для атмосферного

давления такой порог составил ±0,6, для ТПО ±0,7, для хлорофилла и интенсивности промысла ±0,8. Выбор пороговых величин позволил отрегулировать количество выявляемых ДС по соотношению «количество связей — их значимость». Более высокие или низкие пороги приводят либо к переполнению базы данных малозначимыми корреляциями, либо к потере важных в геоэкологическом плане связей с умеренно-сильными корреляциями. Более высокие пороговые величины коэффициентов для хлорофилла и часов лова объясняются сильным стохастическим характером пространственно-временного распределения этих величин и, как следствие, появлением большого количества высоких коэффициентов корреляции между сравниваемыми временными рядами, содержащими много пустот (нулевых значений). Следует отметить, что расчет коэффициентов корреляции велся только между рядами однотипных данных (давление—давление, ТПО—ТПО и т.д.). Поиск ДС между разными видами данных (давление—хлорофилл, ТПО—промысел и др.) на данном этапе исследования не выполнялся, т. к. это потребовало бы дополнительных вычислительных мощностей, целесообразность задействования которых, как нам представляется, должна быть оценена по результатам апробации результатов первого этапа исследований.

Задача массового расчета коэффициентов корреляции для поиска ДС между узлами регулярной сетки не является тривиальной. Пропорционально уменьшению шага регулярной сетки и увеличению интервала возможных сдвигов временных рядов друг относительно друга (на год, на два и т.д.) экспоненциально растет объем требуемых вычислительных операций. Учитывая это, был выбран размер сетки 1×1° и сдвиг рядов на 1 год, что при входных условиях расчета (4 промысловых района, 4 глобальных набора данных) даже без учета предварительной обработки исходных данных потребовало выполнения 31,5 млрд вычислений коэффициента корреляции (табл. 1). Следует отметить, что оптимизация таких расчетов может быть достигнута на последующих этапах исследования несколькими путями: применением быстрого преобразования Фурье, переводом расчетов на платформы графических процессоров и использованием «быстрых» технологий OpenCL и CUDA и др.

Таблица 1

Объем вычислительных операций
для поиска дальних связей при разных размерах регулярной сетки

The number of calculation for searching of the teleconnections for different spatial grids

Размер регулярной сетки, °	Количество узлов в районах промысла СВА, ЦВА, АчА, ЮВТО	Количество узлов в глобальной сетке	Количество комбинаций месяцев из двух последовательных лет	Суммарное количество комбинаций узлов и месяцев	Суммарное количество комбинаций для четырех видов данных
10 × 10	8	648		$7{,}46 \cdot 10^{5}$	$2{,}98 \cdot 10^{6}$
5 × 5	34	2595		$1{,}27 \cdot 10^{7}$	$5{,}98 \cdot 10^{7}$
1 × 1 *	844	64800	144	$7{,}88 \cdot 10^{9}$	$3{,}15 \cdot 10^{10}$
0,5 × 0,5	3376	259200		$1{,}26 \cdot 10^{11}$	$5{,}04 \cdot 10^{11}$
0,1 × 0,1	84400	6480000		$7{,}88 \cdot 10^{13}$	$3{,}15 \cdot 10^{14}$

Примечание: * — вариант расчета, выбранный в данной работе.

На заключительном этапе для 1° узлов с выявленными высокими коэффициентами корреляции по каждому из четырех видов данных осуществлялся расчет коэффициентов линейных регрессий, которые сохранялись в базу данных. Они использовались для прогноза параметров в узлах регулярной сетки. Выбор линейных связей был продиктован их простотой и универсальностью в применении ко многим геоэкологическим и промыслово-океанологическим задачам (оценка продуктивности вод в зависимости от их гидрохимических и термохалинных характеристик, прогнозирование результативности промысла в зависимости от состояния условий среды и др.), а также надежной работой на коротких временных рядах (в данной работе от 9 до 39 значений в ряде), хотя они не лишены некоторых недостатков в условиях нестационарности и нелинейности процессов в климатической системе.

Районы океана, обнаружившие большое количество значимых коэффициентов корреляции с 1° узлами в районах промысла, оконтуривались в соответствии с видом коррелировавшихся данных и преобладающим знаком корреляций, без учета их временных сдвигов (например, район преобладающих положительных корреляций по атмосферному давлению, отрицательных корреляций по ТПО и т.д.). По отношению к районам промысла они рассматриваются как районы ДС. При этом временные сдвиги ДС в них не являются жесткими, а представляют из себя совокупности сдвигов длительностями от 1 до 23 месяцев для разных месяцев и комбинаций 1° узлов, находящихся внутри оконтуренной области.

Результаты

В ходе проведенного исследования выявлены 730 тыс. значимых корреляций меду 1° узлами в пределах промысловых районов Атлантики и ЮВТО и узлами глобальной сетки. Из них на долю поля атмосферного давления приходится 37 % от общего числа обнаруженных связей, на долю интенсивности промысла — 29 %, концентрации хлорофилла — 18 %, ТПО — 16 %. Соотношение количества положительных корреляций к отрицательным составило 1/0,9. Пространственное распределение обнаруженных связей неравномерное (рис. 4).

Районы с наибольшим количеством связей обнаружены в Северной Атлантике (моря Лабрадор, Ирмингера, район Западно-Европейской котловины, Средиземное и Балтийское моря), в Центральной Атлантике (от побережья стран Северо-Западной Африки до Карибского бассейна), в тропической части Тихого океана (от побережья Японии и Австралии до границ исклютельной экономической зоны США, стран Центральной и Латинской Америки), в юго-западной части Индийского океана (южнее о. Мадагаскар), в Южном океане (моря Амундсена, Уэделла).

Анализ положения районов ДС для четырех рассматриваемых промысловых районов (СВА, ЦВА, АчА, ЮВТО) показывает, что они имеют циркумглобальный характер (рис 5). Районы ДС, выявленные по атмосферному давлению, ТПО, концентрации хлорофилла и интенсивности промысла, имеют разную площадь, конфигурацию, находятся как в пределах смежных, так и удаленных географических регионов с самыми разными природными условиями.

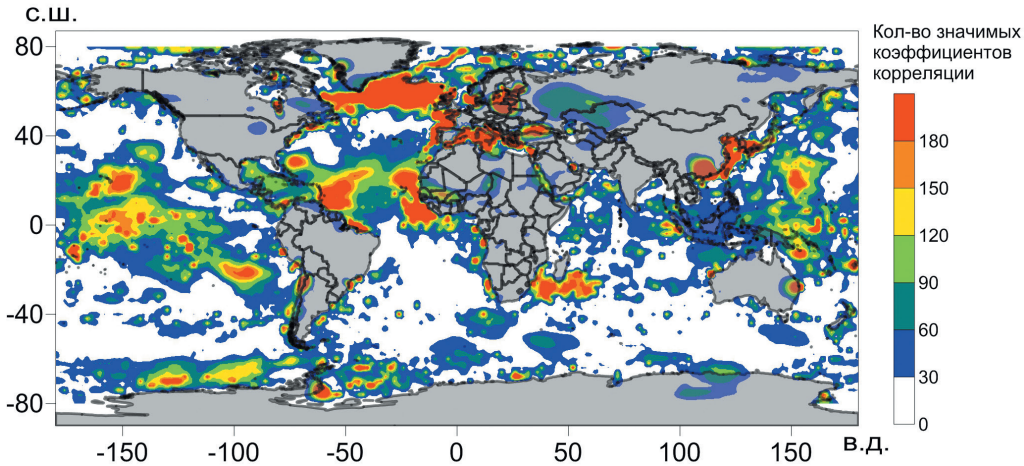

Рис. 4. Суммарное количество значимых коэффициентов корреляций в 1° узлах глобальной регулярной сетки с узлами в районах промысла в СВА, ЦВА, АчА, ЮВТО.

Fig. 4. Total number of significant correlation coefficients in 1° nodes of the global spatial grid with nodes in the fishing areas in North-Eastern and Central-Eastern Atlantic, Antarctic Atlantic Area, South-Eastern Pacific Ocean.

Обсуждение

Площадь районов ДС меняется в широких пределах, при этом, чем район ДС больше, тем большее количество 1° узлов в нем в течение года обнаруживают значимые корреляции с 1° узлами в районе промысла, тем устойчивее такая связь. Таким образом, величины коэффициентов корреляции можно рассматривать как степень связанности районов ДС, а их площадь — как степень устойчивости ДС, ее обеспеченности связями 1° узлов.

Отмечаются два максимума количества коррелирующих 1° узлов в зависимости от расстояния между ними: 0—2 и 12—14 тыс. км (рис. 6 *а*). Первый максимум соответствует внутрирегиональному масштабу ДС, области которых находятся в смежных с районами промысла географических районах (для СВА это акватории моря Ирмингера, Норвежское и Северное моря, открытая часть Северной Атлантики; для ЦВА — Средиземное море, открытая часть Экваториальной Атлантики, Гвинейский залив; для АчА — район развития Антарктического циркумполярного течения (АЦТ) южнее 50° ю.ш.; для ЮВТО — это экваториальные и субантарктические воды от побережья Южной Америки до 150—160° з.д.). ДС внутрирегионального масштаба отражают влияние друг на друга смежных районов через перенос вещества (воздушных и водных масс, биологически активных веществ, биомасс) и энергии (термической, кинетической, промыслового усилия). Второй максимум количества коррелирующих 1° узлов соответствует межрегиональному масштабу, районы таких ДС для СВА, ЦВА, АчА и ЮВТО обнаружены в акваториях Индийского и Западной части Тихого океана, в Южном океане.

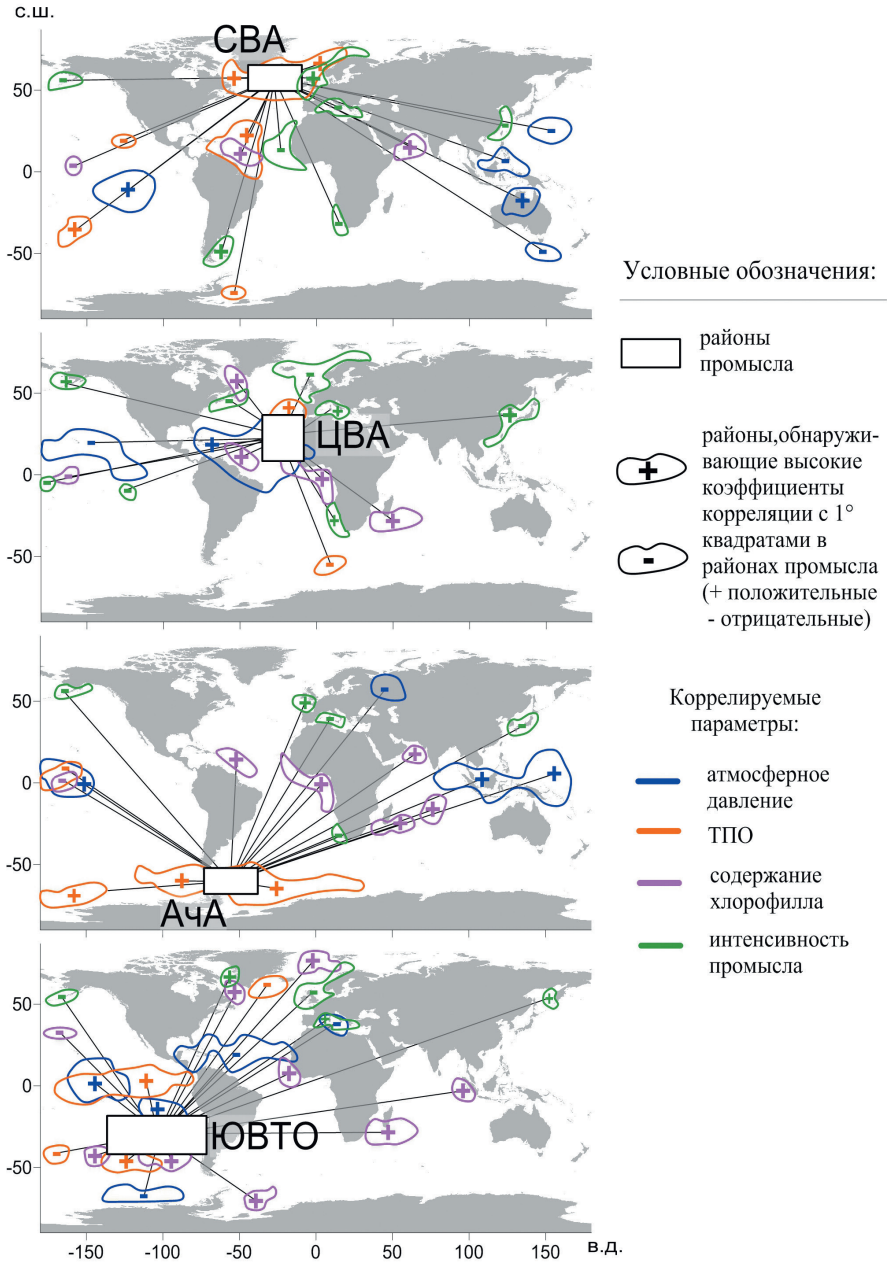

Рис. 5. Основные дальние связи для районов промысла в Атлантике и Юго-Восточной части Тихого океана.

Fig. 5. Main teleconnections for the fishing areas in the Atlantic and South-Eastern Pacific Ocean.

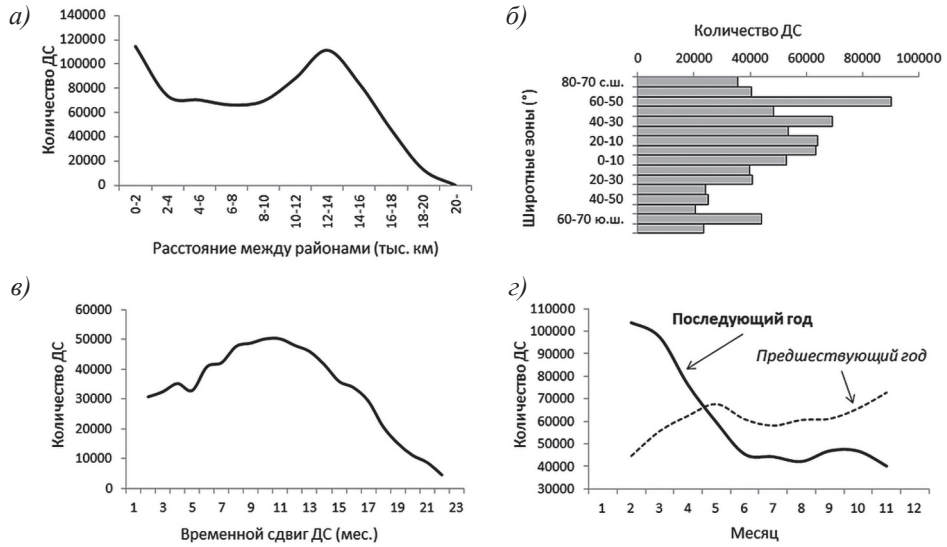

Рис. 6. Зависимость количества связей между 1° узлами от расстояния между ними (*а*), широты (*б*), временного сдвига (*в*), времени года (*г*).

Fig. 6. Dependence of the number of connections between 1° nodes from the mutual distance (*а*), latitude (*б*), time shift (*в*), season (*г*).

Существование таких ДС, вероятно, связано с глобальными параметрами циркуляции атмосферы (волны Россби) и океана (колебания параметров глобального океанического конвейера).

Анализ широтного распределения корреляций 1° узлов показывает, что наибольшее их количество отмечается в северном полушарии — около 90 тыс. единиц между 50—60° с.ш. (рис. 6 *б*). Как известно, в северном полушарии большие массивы суши соседствуют с обширными океаническими акваториями, вследствие чего в системе «океан—атмосфера» действуют крупнейшие энергоактивные зоны, поддерживающие ДС — Азорский, Азиатский и Гренландский барические максимумы, Исландская, Алеутская и Сахарская барические депрессии. Второй максимум корреляций отмечен в южном полушарии — около 45 тыс. связей между 60—70° ю.ш. Это зона действия крупнейшего течения планеты (АЦТ) с системой устойчивых западных ветров, определяющих параметры системы «океан—атмосфера» в южном полушарии.

Наибольшее количество корреляций отмечается при временных сдвигах ДС от 8—9 до 12 месяцев (более 45 тыс. связей 1° узлов, рис. 6 *в*). Их кратность 3—4 месяцам свидетельствует о важной роли в поддержании таких корреляций термического состояния верхнего слоя океана, реагирующего с таким запаздыванием на изменение атмосферной динамики [21, 22]. Большое количество корреляций обнаруживают временные ряды за апрель—июнь и октябрь—декабрь (месяцы предшествующего года, более 60 тыс. связей 1° узлов) и январь—апрель (месяцы

последующего года, более 80 тыс. связей 1° узлов, рис. 6 *г*). Очевидно, что уравнения регрессии по ДС, которые проявляются во втором квартале предшествующего года и которые обеспечены множественными связями 1° узлов, могут стать наиболее точной основой для прогнозирования состояния параметров в 1° узлах промысловых районов в первом квартале последующего года. Заблаговременность такого прогноза составляет 8—12 месяцев.

На рис. 7—8 представлены некоторые примеры ДС между СВА, ЦВА, АчА и ЮВТО и другими промысловыми районами в Атлантическом, Тихом, Индийском и Южном океанах, сопровождаемые графиками хода их параметров в 1° узлах в разные месяцы. Рассматриваемые ДС разнесены на тысячи км друг от друга, а их временные сдвиги лежат в диапазоне от 6 до 16 месяцев. Возможно, что в основе таких ДС лежат объективно существующие цепочки атмосферно-океанических, гидробиологических и промысловых процессов. Из графиков видно, что ДС хорошо характеризуют трендовую динамику параметров, а их высокочастотные колебания в отдельные годы могут существенно отличаться.

Положительная ДС по атмосферному давлению между ЦВА и Центрально-Западной Атлантикой (ЦЗА) с временным сдвигом 7 месяцев, вероятно, является проявлением Восточно-Атлантической ДС, которая представляет из себя вторую ведущую моду низкочастотной изменчивости атмосферной циркуляции над Северной Атлантикой и проявляется во все месяцы года. Отрицательная ДС по атмосферному давлению, имеющая временной сдвиг 10 месяцев, выявленная

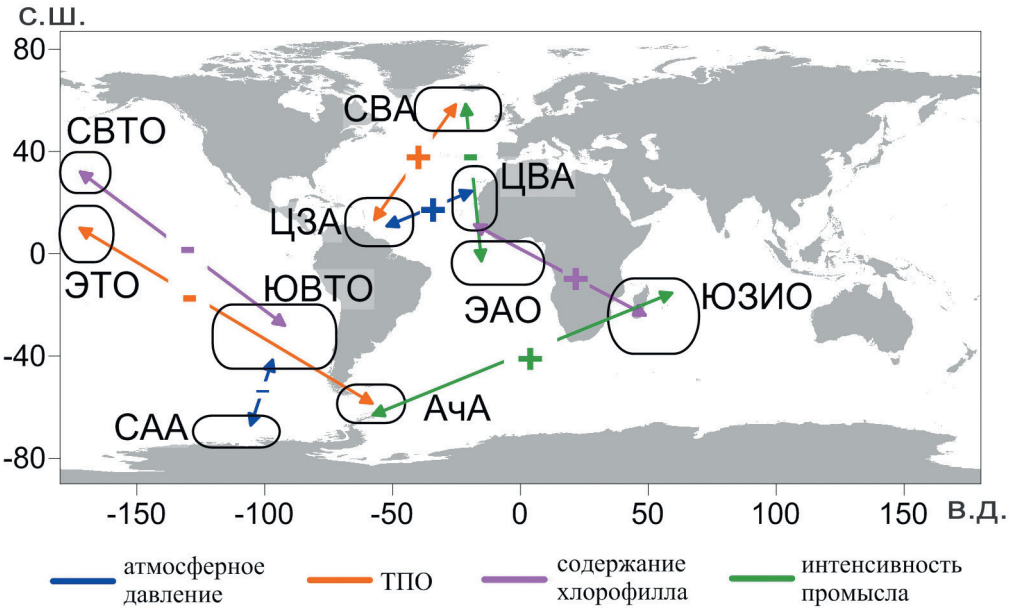

Рис. 7. Примеры дальних связей между промысловыми районами в Атлантическом и Тихом океанах.

Fig. 7. Examples of teleconnections between fishing areas in the Atlantic and Pacific Oceans.

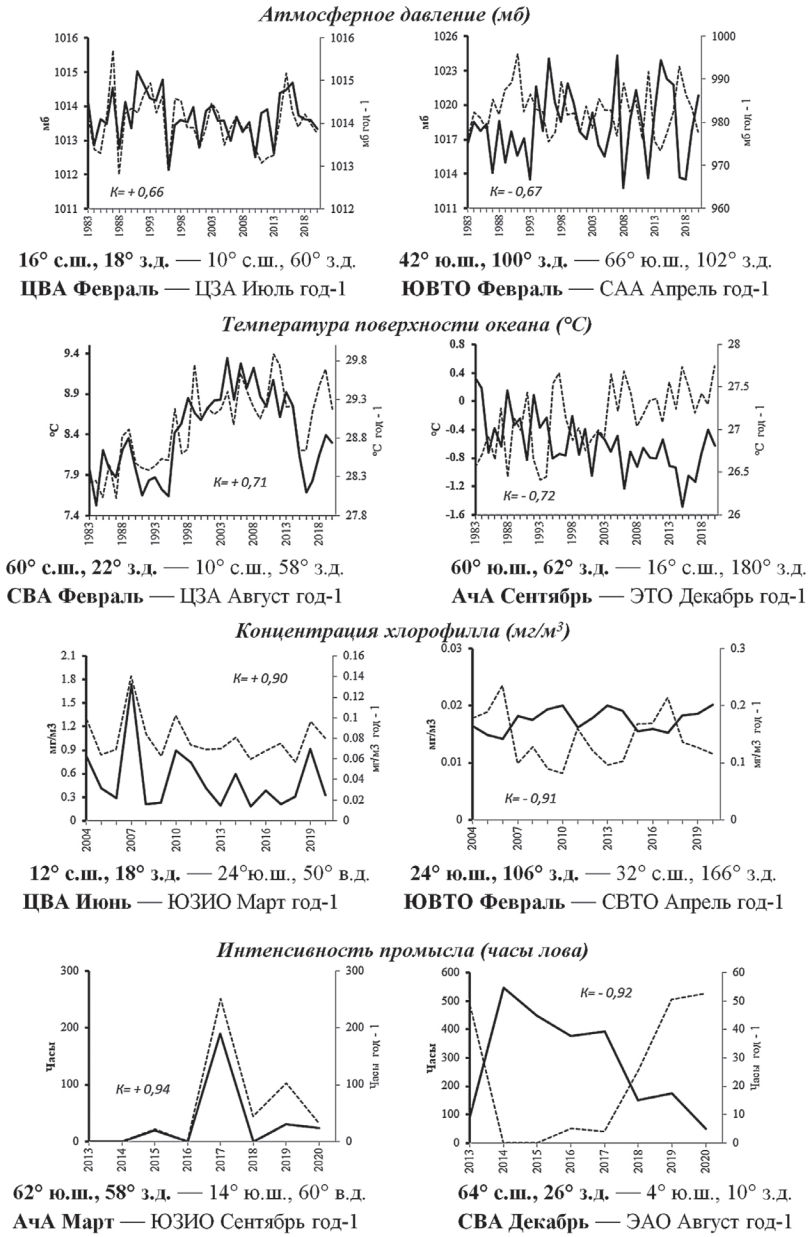

Рис. 8. Примеры дальних связей между промысловыми районами в Атлантическом, Тихом, Индийском и Южном океанах для предшествующих (год-1) и последующих лет (пояснения в тексте).

Fig. 8. Examples of teleconnections between fishing areas in the Atlantic, Pacific, Indian and Southern Oceans for previous (year-1) and subsequent years (explanations in the text).

между ЮВТО и Субантарктическим регионом в районе моря Амундсена, является частью низкочастотной изменчивости атмосферной циркуляции в рамках ААК.

Положительная ДС по ТПО между СВА и ЦЗА, характеризующаяся временным сдвигом 6 месяцев, поддерживается в районе действия Атлантической многодекадной осцилляции (АМО), в рамках которой отмечаются сильно-положительные коэффициенты корреляции между аномалиями ТПО в этих подрайонах [3]. Состояние ТПО тесно связано с атмосферной циркуляцией над Северной Атлантикой, которая имеет четко выраженный сезонный ход. В летний период наблюдается рост атмосферного давления в Северной Атлантике, интенсификация Азорского антициклона и усиленное накопление прогретых вод тропической Атлантики в ее западном секторе — в ЦЗА. В зимний период отмечается падение атмосферного давления, интенсификация Исландской депрессии и зональных атмосферных переносов, усиленное поступления прогретых вод Северо-Атлантического течения в СВА. Многолетнее проявление такой ДС, вероятно, может являться одним из механизмов возникновения АМО. Отрицательная ДС по ТПО между АчА и Экваториальной частью Тихого океана (ЭТО), имеющая временной сдвиг 9 месяцев, не находит прямых аналогов в известных ДС. Вероятно, она является результирующей двух ДС—ААК и ЭНЮК. Последняя, как известно, оказывает глобальное влияние на отдаленные регионы земного шара посредством в основном атмосферных ДС, влияя на экстремальные погодные явления во всем мире [23].

Положительная ДС по содержанию хлорофилла между ЦВА и Юго-Западной частью Индийского океана (ЮЗИО) с временным сдвигом 15 месяцев представляется одним из совместных проявлений Термического индекса южной Атлантики (ТЮА) и Термического индекса Западной части Индийского океана (ЗИО). Временные ряды этих индексов действительно демонстрируют схожесть колебаний при сдвигах друг относительно друга на 14—16 месяцев [5, 24]. Важно то, что районы, связанные обнаруженной ДС, расположены в пределах системы течений, направленных из западной части Индийского океана в ЦВА (Южно-Пассатное течение Индийского океана — Агульяс — Ангольское — Южно-пассатное течение Атлантического океана). Связана ли ДС с колебаниями их интенсивности, или ее природа более комплексная — данный вопрос остается открытым и требует дальнейшего изучения. Отрицательная ДС по хлорофиллу между ЮВТО и Северо-Восточной частью Тихого океана (СВТО) с временным сдвигом в 10 месяцев, вероятно, имеет в своей основе совместные процессы в рамках ЭНЮК—ТДО. Известно, что время существования аномалий ТПО в регионах NINO 1—2, формирующихся в рамках ЭНЮК, может достигать 18 месяцев. Анализ показывает, что ТДО характеризуется наличием близких низкочастотных колебаний ТПО с обратной фазой.

Выявленные ДС по интенсивности промысла между АчА и ЮЗИО, между СВА и ЭАО (см. рис. 7, 8), а также между другими районами промысла (см. рис. 5) могут как носить случайный характер, так и быть результатом сложных цепочек взаимообусловленных процессов гидрометеорологического, океанологического, биологического, социально-экономического характера. Исследование их

в совокупности требует применения иных методических подходов, основанных, например, на применении технологий естественно-языкового машинного обучения на аналитических материалах ресурсных и геоэкологических исследований (отчетах, статьях, обзорах и т.д.), позволяющих выявлять совокупности ведущих геоэкологических факторов для районов промысла [25]. Попытки же объяснить существование таких ДС влиянием только известных гидрометеорологических ДС не являются убедительными, т. к. сводят характер промысловой деятельности, в основе которой лежит разумная деятельность человека, к природно-детерминированным процессам. Тем не менее, количество таких ДС и их широкий географический охват не позволяют игнорировать факт их существования и требуют их дальнейшего изучения.

Среди рассматриваемых видов ДДЗ ТПО имеет наибольшую трендовую составляющую вследствие роста короткопериодной глобальной изменчивости климата в последние два десятилетия [3]. В ряде случаев это увеличивает наблюдаемые значения коэффициентов корреляции. Так для ДС СВА—ЦЗА корреляция скользящих 5-летних трендов достигает 0,86, а остаточных высокочастотных колебаний рядов — лишь 0,40. Ведущая роль многолетних колебаний ТПО в поддержании этой ДС, вероятно, обусловлена масштабным потеплением в Атлантике с середины 1990-х гг., фиксируемым в рамках АМО [3], которое нивелирует менее энергоемкие составляющие этой ДС. Для ДС АчА—ЭТО соотношение корреляций и короткопериодных колебаний иное: —0,90 и —0,64. Значительная роль последних, вероятно, обусловлена слабым проявлением глобальных трендов роста ТПО на обоих концах этой ДС — в АчА и ЭТО. Таким образом, в целом учет региональных особенностей глобальных климатических тенденций крайне важен для оценки выявленных ДС.

Расчеты показывают, что для атмосферного давления, концентрации хлорофилла и интенсивности лова, имеющих неустановленные вследствие разреженности данных или слабые трендовые составляющие (см. рис. 8), их удаление меняет коэффициенты корреляции рядов на ±5—14 %, т. е. в целом незначительно. Несмотря на дискуссионность ДС, выявленных для рядов по хлорофиллу и промыслу, которые имеют связи с состоянием океанологических условий и биоресурсов в районах промысла, они в первом приближении допускают комплексный характер связей в глобальной геоэкосистеме, поэтому должны уточняться и исследоваться дальше по мере накопления по ним ДДЗ.

Предложенная нами интерпретация причинно-следственных связей в рамках выявленных ДС основана на имеющемся объеме знаний об океанологических и гидрометеорологических характеристиках рассматриваемых океанических акваторий, известных индексах ДС в их пределах, ведущих природных процессах (направлениях течений и атмосферных переносов, их сезонности, наличии водных биологическсих ресурсов и промысла и др.). В дальнейших исследованиях такие связи должны верифицироваться формальными методами, например, методом конвергентного кросс-картографирования (англ. Convergent Cross Mapping (CCM), [13]), выявляющим статистические критерии причинности в наборах временных рядов — ее направление и степень. Однако их известные ограничения, например,

неправильное предсказание в ССМ направления причинности на сильно коррелирующих рядах, на которое указывали авторы метода [13], убеждают нас в том, что в анализе ДС (особенно для хлорофилла и интенсивности промысла) необходимо опираться на оба подхода.

Значимость полученных в работе результатов заключается в возможности повышения качества прогнозирования состояния компонентов промысловых геоэкосистем (атмосферы, термических условий поверхностных вод, уровня первичной биопродуктивности и промысловой нагрузки) в районах Атлантики и ЮВТО на основе выявленных характеристик ДС. В пределах промысловых районов для каждого 1° узла, обнаружившего корреляции по тем или иным параметрам, могут быть получены соответствующие коэффициенты линейных регрессий с известными состояниями этих параметров в районах ДС с заблаговременностью от 1 до 23 месяцев (рис. 9). Объединение спрогнозированных в узлах значений в сетку, ее интерполяция и сглаживание позволяет получить прогнозное состояние отдельных компонентов геоэкосистемы как для района промысла в целом, так и для его отдельных подрайонов (рис. 10).

Важным вопросом является анализ устойчивости выявленных корреляций с последующим ростом временных рядов по мере накопления ДДЗ. Будут ли отмечаться значительные изменения числа коррелирующих 1° узлов или общая картина распределения районов ДС сохранит свои черты? Как повлияет современное изменение климата на количество связей? Анализ показывает, что существует обратная экспоненциальная зависимость между длиной коррелируемых рядов и количеством выявляемых для них значимых корреляционных связей (рис. 11).

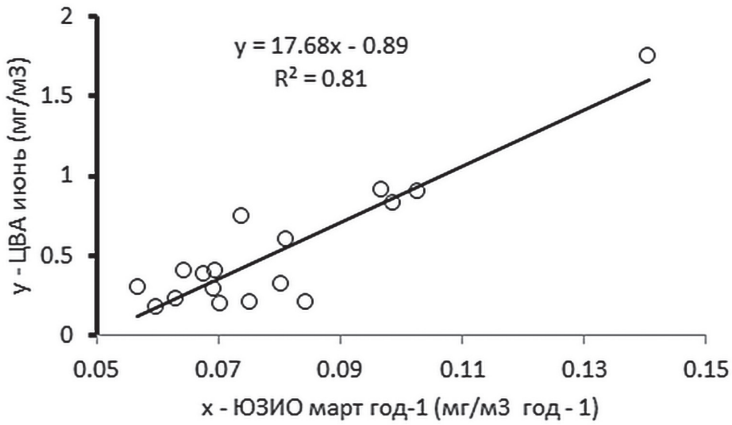

Рис. 9. Регрессионная зависимость между концентрацией хлорофилла в Центрально-Восточной Атлантике (12° с.ш.,18° з.д.) в июне и в Юго-Западной части Индийского океана (24° ю.ш., 50° в.д.) в марте предыдущего года.

Fig. 9. Regression between the concentration of chlorophyll in the Central-Eastern Atlantic (12°N, 18°W) in June and the South-Western Indian Ocean (24°S, 50°E) in March of the previous year.

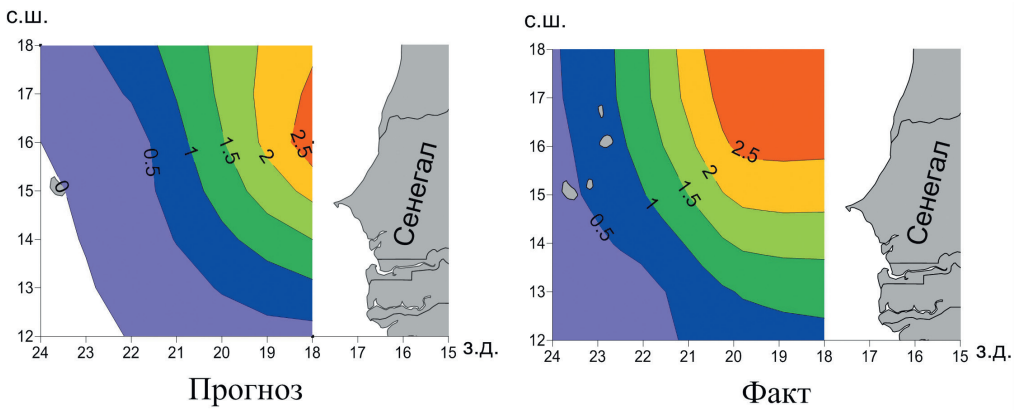

Рис. 10. Фактическое распределение концентрации хлорофилла (мг/м^3) в Сенегальском подрайоне Центрально-Восточной Атлантики в июне 2020 г. и его прогноз по данным концентрации в Юго-Западной части Индийского океана в марте 2019 г.

Fig. 10. The observed distribution of chlorophyll concentration (mg/m^3) in the Senegal subarea of the Central-Eastern Atlantic in June 2020 and its forecast based on the concentration in the South-Western Indian Ocean in March 2019.

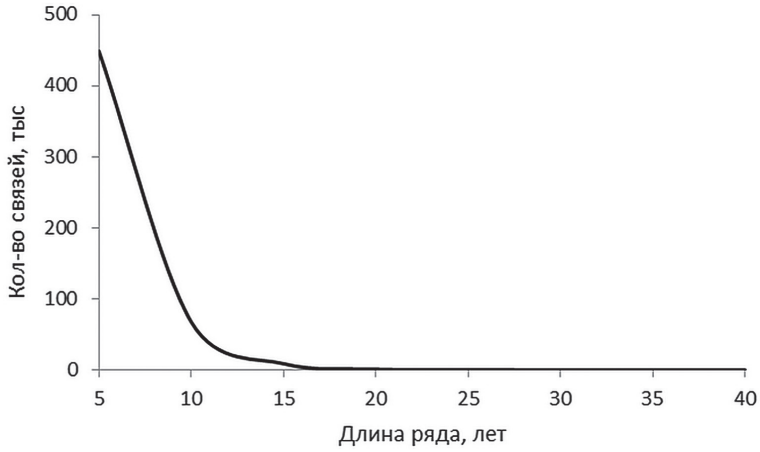

Рис. 11. Количество значимых корреляций для 1° узла в зависимости от длины коррелируемых временных рядов.

Fig. 11. The number of significant correlations per 1° node depending on the length of the correlated time series.

Чем длиннее коррелируемые временные ряды, тем меньшее количество значимых коэффициентов корреляции для них выявляется, тем меньшее количество связей попадает в конечную БД после их фильтрации. При длине рядов 5 лет суммарное

количество значимых коэффициентов корреляции для одного 1° узла может достигать 450 тыс., т. е. его значимые связи в течение года могут покрывать до 7 % площади Мирового океана. При увеличении длины временных рядов количество значимых коэффициентов корреляций быстро падает и при длине ряда 35—40 лет снижается до 60 связей на один узел, что эквивалентно 0,001 % площади Мирового океана.

Из представленного на рис. 11 графика видно, что минимальной длиной ряда, при которой количество выявляемых корреляций при дальнейшем увеличении ряда остается постоянным, является рубеж 15—16 лет. Это следует учитывать при оценке результатов корреляции, полученных для массива данных промысловой активности с временными рядами продолжительностью 9 лет (2012—2020 гг.). Исходя из графика, репрезентативные данные по ДС для этого параметра можно получить не ранее 2027—2028 гг., когда длина рядов наблюдений в узлах глобальной 1° сетки достигнет 15—16 лет. Количество ДС и конфигурация их районов, вероятнее всего, будут меняться в будущем и из-за нестационарности глобальной климатической системы. Однако предсказать направленность этих тенденций не представляется возможным вследствие большого спектра возможных сценариев изменения климата в будущем.

Заключение

В рамках идеологии БД, подразумевающей простые, быстрые, массовые и эффективные способы обработки больших массивов поступающих первичных и производных вторичных данных на основе методов корреляционного и регрессионного анализа, в работе были обработаны ДДЗ за последние 9—39 лет. Современные ДДЗ (атмосферное давление, ТПО, содержание хлорофилла и интенсивность промысла) могут всесторонне характеризовать состояние морских геоэкосистем в глобальном масштабе и вследствие своих объемов, скорости поступления и разнообразия данных рассматриваются как разновидность БД.

Установлено, что корреляционные зависимости между рядами среднемесячных данных основных видов ДДЗ в 1° узлах глобальной регулярной сетки с временными сдвигами 1—23 месяца крайне многочисленны. Районы океана, содержащие большое количество таких корреляций с действующими и перспективными районами промысла в Атлантике и ЮВТО, могут рассматриваться по отношению к ним как районы ДС. Районы ДС для СВА, ЦВА, АчА и ЮВТО встречаются во всех районах Мирового океана.

Большинство выявленных ДС находят свое отражение в рамках известных климатических индексов (САК, ЭНЮК, ААК и др.), детализируют и уточняют их проявление в разные месяцы года на разных участках промысловых районов. Это достигнуто благодаря применению идеологии работы с БД, массовости проведенных расчетов по поиску корреляционных и линейных регрессионных зависимостей. В исследовании была обобщена статистическая информация о пространственно-временных закономерностях корреляционных связей 1° узлов. Рассмотрены зависимости количества связей между узлами от расстояния между ними,

широтная обусловленность распределения коррелируюших узлов, сдвиги временных рядов в узлах, которые выявляют наибольшее количество корреляций, связь количества корреляций с временем года и длиной временных рядов.

Полученные характеристики ДС могут повысить качество прогнозирования состояния промысловых геоэкосистем в промысловых районах Атлантики и ЮВТО с применением регрессионных зависимостей с известными состояниями их параметров в районах ДС с заблаговременностью от 1 до 23 месяцев.

Перспективными направлениями дальнейших работ представляются:

— поиск районов ДС на основе совместного анализа разнородных данных, например «атмосфера—ТПО», «хлорофилл—промысел», «ТПО—промысел» и др., с последующим поиском механизмов таких ДС;

— расширение географии районов, для которых осуществляется поиск ДС, вплоть до всей акватории Мирового океана;

— увеличение сдвигов временных рядов друг относительно друга до 3—5 лет для прогнозирования состояния геоэкосистем с большей заблаговременностью.

Однако такой анализ потребует гораздо большего объема машинных ресурсов, чем были задействованы в данной работе — около 60—70 трлн вычислений, даже при сохранении размера регулярной сетки в 1°.

В целом, исследование показало, что ДС играют значительную роль в изменчивости внутренней пространственно-временной структуры и функционировании географической оболочки и входящих в нее компонентов — атмосферы, гидросферы, биосферы, антропосферы. Поэтому изучение параметров функционирования природно-антропогенных морских геоэкосистем должно сопровождаться исследованием не только самих районов промысла, но и удаленных районов Мирового океана, с которыми они обнаруживают ДС.

Автор благодарит своего научного руководителя, д-ра геогр. наук, профессора Чернышкова Павла Петровича за ценные советы при подготовке данной работы.

Список литературы

1. ФАО. Состояние мирового рыболовства и аквакультуры 2020. Меры по повышению устойчивости. Рим: ФАО, 2020. 205 с. doi: 10.4060/ca9229ru.
2. *Холмянский М.А., Снопова Е.М., Владимиров М.В., Заносов О.Ю.* Современное состояние и прогноз развития морских геоэкологических исследований // Ученые записки РГГМУ. Вып. 48. 2017. С. 216—233.
3. *Кровнин А.С.* Роль крупномасштабных климатических факторов северного полушария в многолетних колебаниях запасов основных объектов российского промысла: дис. … канд. геогр. наук. М., 2019. 149 с.
4. *Chase T.N., Pielke R.A., Avissar R.* Teleconnections in the Earth System // Encyclopedia of Hydrological Sciences. Part 15 — Global Hydrology. 2006. 29 p. doi: 10.1002/0470848944.
5. *Chen Y., Randerson J.T., Coffield S.R., Foufoula Georgiou E., Smyth P., Graff C.A., Morton D.C., Andela N. Werf G.R., Giglio L., Ott L.E.* Forecasting global fire emissions on subseasonal to seasonal (S2S) time scales // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2020. V. 12. 25 p. doi: 10.1029/2019MS001955.
6. *Chang N.B., Yang Y.J., Imen S., Mullon L.* Multi-scale quantitative precipitation forecasting using nonlinear and nonstationary teleconnection signals and artificial neural network models // J. Hydrol. (Amst). 2017. V. 548. P. 305—321.

7. *Silva I.M., Medeiros D.M., Mesquita M.S.* Investigating teleconnection patterns associated with the rainy season of the northern northeast Brazil using a hidden Markov model // Climate Dynamics. V. 55. 2020. P. 2075—2088.
8. *Zhou D, Gozolchiani A., Ashkenazy Y., Havlin S.* Teleconnection Paths via Climate Network Direct Link Detection // PRL 115, 268501. 2015. 5 p.
9. *Boers N., Goswami B., Rheinwalt A., Bookhagen B., Hoskins B., Kurths J.* Complex networks reveal global pattern of extreme-rainfall teleconnections // Nature. 2019. V. 566. P. 373—377.
10. *Qiao, P., Liu, W., Zhang, Y., Gong, Z.* Complex Networks Reveal Teleconnections between the Global SST and Rainfall in Southwest China // Atmosphere. 2021. V. 12 (101). 13 p. doi: 10.3390/atmos12010101.
11. *Ying N., Zhou D., Chen Q., Ye Q., Han Z.* Long-term link detection in the CO_2 concentration climate network // Journal of Cleaner Production. 2019 (208). P. 1403—1408.
12. *Runge, J., Petoukhov, V., Kurths, J.* Quantifying the Strength and Delay of Climatic Interactions: The Ambiguities of Cross Correlation and a Novel Measure Based on Graphical Models // Journal of Climate. 2014. V. 27 (2). P. 720—739.
13. *Sugihara, G., May R., Ye H., Hsieh C., Deyle E., Fogarty M., Munch S.* Detecting causality in complex ecosystems // Science. 2012. V. 338. P. 496–500.
14. *Гансвинд И.Н.* Малые космические аппараты в дистанционном зондировании Земли // Исследование Земли из космоса. 2019. № 5. С. 82—88.
15. *Болбаков Р.Г.* Большие данные в информационных науках // Образовательные ресурсы и технологии. 2017 (18). С. 30—35. doi: 10.21777/2312-5500-2017-1-30-35.
16. *Китчин Р.* Большие данные, новые эпистемологии и смена парадигм / Перевод: *Kitchin R.* Big Data, New Epistemologies and Paradigm Shifts / Big Data & Society. 2014. V. 1. Iss. 1. P. 1—12) // Социология. 4М. 2017. № 44. С. 111—152.
17. NOAA NCEP-NCAR CDAS-1 MONTHLY Intrinsic MSL pressure: Pressure data. [Электронный ресурс]. URL: https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-NCAR/.CDAS-1/.MONTHLY/.Intrinsic/.MSL/.pressure/ (дата обращения: 29.03.2021).
18. IGOSS nmc Reyn_SmithOIv2 monthly sst: Sea Surface Temperature data. [Электронный ресурс]. URL: https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.IGOSS/.nmc/.Reyn_SmithOIv2/.monthly/.sst/index.html?Set-Language=ru (дата обращения: 27.03.2021).
19. MODIS Reprocessing 2018. [Электронный ресурс]. URL: http://orca.science.oregonstate. edu/1080.by.2160.monthly. hdf.chl.modis.php (дата обращения: 26.03.2021).
20. GlobalFishingWatch. [Электронный ресурс]. URL: https://globalfishingwatch.org/datasets-and-code/fishing-effort/ (дата обращения: 28.03.2021).
21. *Малинин В.Н., Чернышков П.П., Гордеева С.М.* Канарский апвеллинг: крупномасштабная изменчивость и прогноз температуры воды. СПб.: Гидрометеоиздат, 2002. 155 с.
22. *Малинин В.Н., Гордеева С.М.* Промысловая океанология юго-восточной части Тихого океана. Том. I. Изменчивость факторов среды обитания. СПб.: РГГМУ, 2009. 278 с.
23. *Серых И.В.* О роли Эль-Ниньо — Глобальной атмосферной осцилляции в межгодовой изменчивости гидрометеорологических процессов // Гидрометеорология и экология. 2021. № 63. С. 329—370. doi: 10.33933/2713-3001-2021-63-329-370.
24. OOPC NOAA. The State of the Ocean Climate. [Электронный ресурс]. URL: https://stateoftheocean.osmc.noaa.gov/sur/atl/sat.php (дата обращения: 03.07.2021).
25. *Краснобородько О.Ю.* Применение естественно-языкового машинного обучения для обобщения геоэкологических параметров пелагических биоресурсов Атлантического и Юго-Восточной части Тихого океанов // Гидрометеорология и экология. 2021. № 63. С. 279—296. doi: 10.33933/2713-3001-2021-63-279-296.

References

1. *FAO. Sostoyanie mirovogo rybolovstva i akvakul'tury 2020. Mery po povysheniyu ustojchivosti.* FAO. The State of World Fisheries and Aquaculture 2020. Measures to Increase Sustainability. Rome, FAO, 2020: 205. doi.org/10.4060/ca9229ru. [In Russian].

2. *Kholmyansky M.A., Snopova E.M., Vladimirov M.V., Zanosov O.Yu.* Current state and forecast of development of marine geoecological research. *Uchenye zapiski RGGMU.* Scientific notes RSHU. 2017, 48: 216—233. [In Russian].
3. *Krovnin A.S.* The role of large-scale climatic factors of the northern hemisphere in long-term fluctuations of the Russian industry's fishery stocks. *Dissertaciya na soiskanie uchenoj stepeni kandidata geograficheskih nauk.* PhD. thesis. Geographic Sciences. Moscow, 2019: 149 p. [In Russian].
4. *Chase T.N., Pielke R.A., Avissar R.* Teleconnections in the Earth System. Encyclopedia of Hydrological Sciences. Part 15 — Global Hydrology. 2006: 29 p. doi: 10.1002/0470848944.
5. *Chen Y., Randerson J.T., Coffield S.R., Foufoula-Georgiou E., Smyth P., Graff C.A., Morton D.C., Andela N. Werf G.R., Giglio L., Ott L.E.* Forecasting global fire emissions on subseasonal to seasonal (S2S) time scales. Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2020, 12, e2019MS001955: 25. doi: 10.1029/2019MS001955.
6. *Chang N.B., Yang Y.J., Imen S., Mullon L.* Multi-scale quantitative precipitation forecasting using nonlinear and nonstationary teleconnection signals and artificial neural network models. J. Hydrol. (Amst). 2017, 548: 305—321.
7. *Silva I.M., Medeiros D.M., Mesquita M.S.* Investigating teleconnection patterns associated with the rainy season of the northern northeast Brazil using a hidden Markov model. Climate Dynamics. 2020, 55: 2075—2088.
8. *Zhou D, Gozolchiani A., Ashkenazy Y., Havlin S.* Teleconnection Paths via Climate Network Direct Link Detection. PRL 115, 268501. 2015: 5.
9. *Boers N., Goswami B., Rheinwalt A., Bookhagen B., Hoskins B., Kurths J.* Complex networks reveal global pattern of extreme-rainfall teleconnections. Nature. 2019, 566: 373—377.
10. *Qiao P., Liu W., Zhang Y., Gong Z.* Complex Networks Reveal Teleconnections between the Global SST and Rainfall in Southwest China. Atmosphere 2021, 12(101): 13. doi: 10.3390/atmos12010101.
11. *Ying N., Zhou D., Chen Q., Ye Q., Han Z.* Long-term link detection in the CO_2 concentration climate network. Journal of Cleaner Production. 2019, 208: 1403—1408.
12. *Runge, J., Petoukhov, V., Kurths, J.* Quantifying the Strength and Delay of Climatic Interactions: The Ambiguities of Cross Correlation and a Novel Measure Based on Graphical Models. Journal of Climate. 2014, 27(2): 720—739.
13. *Sugihara G., May R., Ye H., Hsieh C., Deyle E., Fogarty M., Munch S.* Detecting causality in complex ecosystems. Science. 2012, 338: 496—500.
14. *Ganswind I.N.* Small spacecraft in remote sensing of the Earth. *Issledovanie Zemli iz kosmosa.* Research of the Earth from Space. 2019, 5: 82—88. [In Russian].
15. *Bolbakov R.G.* Big data in information sciences. *Obrazovatel'nye resursy i tekhnologii.* Educational resources and technologies. 2017, 18: 30—35. doi: 10.21777/2312-5500-2017-1-30-35. [In Russian].
16. *Kitchin R.* Big Data, New Epistemologies and Paradigm Shifts. In Big Data & Society. 2014, 1(1): 1—12. *Sociologiya.* Sociology. 4M. 2017, 44: 111—152. [In Russian].
17. NOAA NCEP-NCAR CDAS-1 MONTHLY Intrinsic MSL pressure: Pressure data. Available at: https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.NOAA/.NCEP-NCAR/.CDAS-1/.MONTHLY/.Intrinsic/ .MSL/.pressure/ (date accessed: 29.03.2021).
18. IGOSS nmc Reyn_SmithOIv2 monthly sst: Sea Surface Temperature data. Available at: https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.IGOSS/.nmc/.Reyn_SmithOIv2/.monthly/ .sst / index.html? Set-Language = ru (date accessed: 27.03.2021).
19. MODIS Reprocessing 2018. Available at: http://orca.science.oregonstate. edu/1080.by.2160.monthly.hdf.chl.modis.php (date accessed: 26.03.2021).
20. GlobalFishingWatch. Available at: https://globalfishingwatch.org/datasets-and-code/fishing-effort/ (date accessed: 28.03.2021).
21. *Malinin V.N., Chernyshkov P.P., Gordeeva S.M. Kanarskii apvelling: krupnomasshtabnaia izmenchivost' i prognoz temperatury vody.* Canary upwelling: large-scale variability and forecast of water temperature. St. Petersburg.: Gidrometeoizdat, 2002: 155 p. [In Russian].
22. *Malinin V.N., Gordeeva S.M. Promyslovaia okeanologiia iugo-vostochnoi chasti Tikhogo okeana. Tom I. Izmenchivost' faktorov sredy obitaniia.* Fishery oceanology of the southeastern part of the Pacific Ocean. Tom I. Variability of environmental factors. St. Petersburg: RSHU, 2009: 278 p. [In Russian].

23. *Serykh I.V.* On the role of El Niño — Global Atmospheric Oscillation in the interannual variability of hydrometeorological processes. *Gidrometeorologiya i Ekologiya.* Journal of Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2021, 63: 329—370. doi: 10.33933/2713-3001-2021-63-329-370. [In Russian].
24. OOPC NOAA. The State of the Ocean Climate. Available at: https://stateoftheocean.osmc.noaa.gov/sur/atl/sat.php (date accessed: 03.07.2021).
25. *Krasnoborodko O.Yu.* Application of natural language machine learning for generalization of geoecological parameters of pelagic biological resources in the Atlantic and South-Eastern Pacific oceans. *Gidrometeorologiya i Ekologiya.* Journal of Hydrometeorology and Ecology (Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University). 2021. 63: 279—296. doi: 10.33933/2713-3001-2021-63-279-296/ [In Russian].

Конфликт интересов: конфликт интересов отсутствует.

Статья поступила 30.05.2021
Принята к публикации после доработки 12.08.2021

Сведения об авторе

Краснобородько Олег Юрьевич, заведующий лабораторией промысловой океанологии Атлантического филиала ФГБНУ «ВНИРО» («АтлантНИРО»), sea@atlantniro.ru.

Information about the author

Krasnoborodko Oleg Yurievich, Head of the Laboratory of Fishery Oceanology of the Atlantic Branch of «VNIRO» («AtlantNIRO»), sea@atlantniro.ru.