© Нецветаева О.П., Коробов В.Б., Антипов Е.О., Тутыгин А.Г., 2020, Океанологические исследования, 2020, Том 48, № 1, С. 73–84

УДК 556.042 DOI: 10.29006/1564-2291.JOR-2020.48(1).5

ОПТИМИЗАЦИЯ СЕТИ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА БЕЛОГО МОРЯ

Нецветаева О.П.[1], Коробов В.Б.[2], Антипов Е.О.[3], Тутыгин А.Г.[3]

[1]Национальный парк «Русская Арктика», Архангельск, 163000, Россия
e-mail: netsvetaeva@rus-arc.ru
[2]Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва, 117997, Россия
e-mail: szoioran@mail.ru
[3]Федеральный исследовательский центр комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова УрО РАН, Архангельск, 163000, Россия
e-mail: antipov_eo@mail.ru; andgt64@yandex.ru
Статья поступила в редакцию 23.03.2020, одобрена к печати 10.04.2020

Для морских акваторий, характеризующихся высокой изрезанностью береговой черты, значительным количеством островов и отмелей, большое значение имеет порядок выполнения станций научно-исследовательскими судами при производстве экологического мониторинга. В статье предложена методология, основанная на предварительном районировании акватории с целью уменьшения количества гидрохимических станций, с последующей оптимизацией пути их прохождения научно-исследовательскими судами. Оптимизация выполнена при помощи усовершенствованного применительно к данному случаю алгоритма известной задачи коммивояжёра. На примере наблюдения за степенью насыщения кислородом Белого моря показано, что такой подход позволяет сократить время одной съёмки на 15–20%.

Ключевые слова: мониторинг, Белое море, районирование, задача коммивояжёра, оптимизация

Введение

В системе мониторинга природных объектов наблюдения носят ключевой характер. Это касается как мониторинга окружающей среды в целом (Израэль, 1984), так и мониторинга отдельных промышленных комплексов, например, морских буровых платформ и отгрузочных нефтяных терминалов (Губайдуллин, Коробов, 2012). По результатам мониторинга осуществляется контроль состояния природной среды, а сами данные используются для разработки математических моделей распространения загрязняющих веществ, необходимых для прогноза состояния природной среды.

В арктических морях проведение наблюдений имеет свою специфику. Обусловлена она, главным образом, тремя обстоятельствами: сильной изрезанностью береговой черты, наличием большого количества островов и многочисленными отмелями (Залогин, Косарев, 1999). Данные условия создают существенные трудности для передвижения судов по акваториям, особенно при необходимости присутствия во многих точках за один рейс (Антипов и др., 2017), что имеет место и при мониторинге.

Исторически сложилось так, что точки измерения характеристик морских вод – температуры, солёности, течений и отбора проб представляют собой нерегулярную сетку (рис. 1). Это обусловлено как конфигурацией акватории, так и необходимостью решения конкретных научных задач: изучения термохалинных процессов, расчёта водообмена, моделирования циркуляции и других. Если посмотреть на сетку наблюдений, то можно отметить, что она состоит из разрезов – станций, расположенных вдоль одной линии, и одиночных станций. При таком сочетании точек возникает проблема их оптимального обхода судном, чтобы время обхода было минимальным.

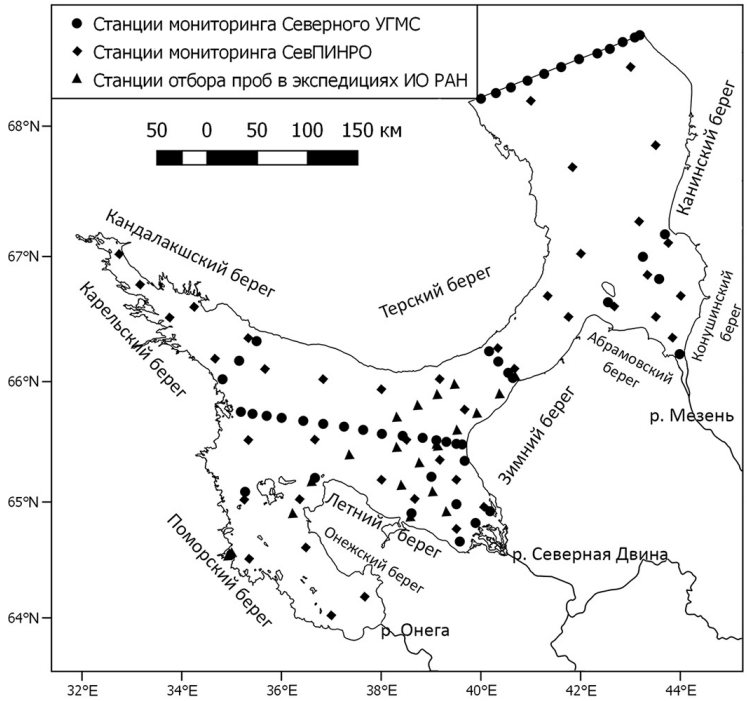

Рис. 1. Карта-схема Белого моря с обозначением станций мониторинга (Гидрометеорология…, 1991 а,б; Нецветаева и др., 2017; Политова и др., 2014; Клювиткин и др., 2015).

Задача совершенствования системы мониторинга стояла всегда и, несмотря на множество предпринимаемых усилий, ещё далека от своего разрешения. Отметим лишь наиболее значимые направления. Это оптимизация сети наблюдений, выбор контролируемых показателей и частота наблюдений. При этом экономический аспект, а именно таковым является время осуществления съёмки акватории, в явном виде не затрагивался. Необходимо отметить, что время проведения съёмки акватории влияет не только на собственно экономические показатели, но также на своевременность принятия управленческих решений в кризисных ситуациях, что может иметь решающее значение для снижения экологического ущерба, вызванного техногенными катастрофами (Воробьёв и др., 2012).

Расположение станций наблюдения должно учитывать пространственные закономерности протекания гидрологических, гидрохимических и гидробиологических процессов. Ещё одним требованием к сети мониторинга

является возможность построения наиболее достоверных карт распределения по пространству наблюдаемых элементов гидрологического, гидрохимического и гидробиологического режимов, что достигается посредством применения интерполяционных и экстраполяционных моделей и представляет собой отдельную задачу.

При проведении экологического мониторинга морских вод основными наблюдаемыми характеристиками являются: температура, солёность, прозрачность, содержание различных гидрохимических элементов: кислорода, pH, щёлочности, биогенов, угольной кислоты, сероводорода, окисляемости, биохимического потребления кислорода (БПК) и веществ, характеризующих загрязнение вод, например, нефтепродуктов, фенолов, детергентов, тяжёлых металлов (Руководство по гидрологическим работам…, 2016).

Провести оптимизацию всех этих характеристик одновременно весьма затруднительно, поскольку они по-разному ведут себя в водной среде. Поэтому мы посчитали целесообразным начать разработку процедур оптимизации сети экологического мониторинга с одного из наиболее важных показателей – степени насыщения кислородом. Растворённый в морской воде кислород создает окислительную обстановку среды, взаимодействует с взвешенными и растворёнными веществами, участвует в биологических циклах, в разложении органического вещества и т.д. (Биогеохимия океана, 1983). Уровень насыщенности кислородом морских вод, в отличии от концентрации кислорода, которая тесно связана с температурой и солёностью, характеризует избыток или дефицит кислорода, что определяется соотношением продукционных и деструкционных процессов, протекающих в них (Алекин, Ляхин, 1984).

Как следствие, кислород связан с целым рядом других показателей (кроме температуры и солёности, наличие связи с которыми отмечено выше), таких как pH (Ляхин, 1981; Маккавеев, 2009; Frieder et al., 2016), содержание биогенных элементов (Doods, 2006; Zhu et al., 2011), хлорофилла «а» (Нецветаева и др., 2018), органического вещества (Diaz, Rosenber, 2008; Романкевич и др., 2009) и другие.

Целью настоящих исследований является разработка процедур оптимизации сети наблюдений и маршрута движения научно-исследовательского судна при проведении экологического мониторинга арктических морей.

Объект исследования

В качестве объекта исследований нами выбрано Белое море, принадлежащее бассейну Северного Ледовитого океана. Белое море по изрезанности береговой черты не имеет аналогов среди всех морей Российской Арктики (Каплин и др., 1991) и изобилует навигационными опасностями (Лоция Белого моря, 1995). Такая конфигурация, вместе со сложной картиной приливов и большим объёмом речного стока, создаёт сложную пространственно-временную картину изменчивости практически всех элементов гидрологического, гидрохимического и гидробиологического режимов (Гидрометеорология…, 1991 а,б; Лисицын и др., 2010).

Данные обстоятельства делают Белое море уникальным природным объектом, позволяющим рассматривать его как лабораторию для разработки различных методологий.

Материалы и методы

В качестве исходных данных использовались данные по результатам съемок ФГБУ «Северное УГМС» за период 1979–2014 гг. (Ежегодные данные…, 1979–2014), Северного филиала ФГБНУ «Полярный научно-исследовательский институт рыбного хозяйства и океанографии им. Н.М. Книповича» (СевПИНРО) за период 2001–2014 гг. (за исключением 2009 г.) (Нецветаева, Змётная, Коробов, 2017) и Института океанологии им. П.П. Ширшова РАН (ИО РАН) во время экспедиций летом 2013 г. (Политова и др., 2014) и 2014 г. (Клювиткин и др., 2015) на НИС «Эколог».

Определение содержания растворённого кислорода проводилось Северным УГМС, СевПИНРО и ИО РАН в поверхностном и придонном слоях с помощью стандартного метода Винклера (Методы гидрохимических исследований основных биогенных элементов, 1988; РД 52.10.243-92., 1993; РД 52.10.736-2010., 2010).

Совершенствование системы мониторинга, применительно к рассматриваемому случаю, представляет собой две самостоятельные задачи: уменьшение точек наблюдения и сокращение маршрута НИС. Первая из них может решаться следующим образом. Поскольку, как отмечено выше, точки наблюдений выбираются таким образом, чтобы характеризовать как можно большую площадь акватории, то с этой целью всю акваторию необходимо разбить на однородные участки, то есть провести её районирование. Тогда в пределах одного района совокупность точек можно заменить на одну.

Для построения полей степени насыщения кислородом на нерегулярных сетках интерполяцию предпочтительнее проводить при помощи неточных интерполяторов (Коновалова и др., 2006). Применительно к данному случаю были разработаны специальные процедуры, позволяющие строить поля степени насыщения кислородом в автоматическом режиме. В основе построения карт заложен метод RBF-ML (вариация интерполяционного алгоритма RBF (Radial Basis Function) с поддержкой многослойности) (Коробов и др., 2015).

Районирование представляет собой последовательность действий, целью которых является выделение однородных по качеству участков территорий и акваторий. Это позволяет вместо измерений характеристик природной среды во множестве точек в пределах всего района ограничиваться измерениями всего лишь в одной точке в его пределах.

Шкала для районирования акватории Белого моря была разработана с использованием нечётких множеств (Заде, 1976), при этом интервалы шкалы устанавливаются при помощи функции принадлежности, определённой экспертным путём.

Оптимизация маршрута осуществлялась по принципу хорошо известной задачи коммивояжёра. Эта задача комбинаторной оптимизации относится к классу NP-трудных задач, что существенным образом затрудняет поиск эффективных алгоритмов её решения (Стюарт, 2019). Несмотря на эти обстоятельства, для неё разработано достаточно большое количество алгоритмов, дающих возможность во многих случаях получать эффективные решения за разумное время.

В данном случае был реализован один из самых простых алгоритмов – метод ближайшего соседа. Этот метод в исходной формулировке заключается в нахождении замкнутой кривой минимальной длины, соединяющей заданный набор точек на плоскости. Одним из показателей адекватности предложенного маршрута, является сведение к минимальному количеству число петель на графе.

В самом простом виде условие оптимизации в задаче коммивояжёра можно записать в виде формулы (Гордеева, Самойлова, 2018):

$$S = \sum_{i,j=1}^{N} c_{ij} x_{ij} \rightarrow min,$$

где S – интегральный показатель оптимизации, характеризующий затраты на прохождение маршрута. Затраты определяются из особенностей задачи: транспортных средств, условий эксплуатации и других факторов, влияющих на определение стоимости.

При реализации этого алгоритма пришлось столкнуться с двумя методологическими проблемами: изрезанностью береговой черты, вследствие чего стандартные алгоритмы в ряде случаев соединяют некоторые ближайшие точки по суше, и ограничениями на количество точек в стандартных пакетах, ввиду слишком большого числа возможных вариантов перебора. Первая проблема была решена введением особых точек, учитывающих геометрию береговой черты, и тем самым исключающих соединение точек через сушу. Вычислительные ограничения преодолевались путём разбиения области вычисления на самостоятельные участки, в пределах которых решения находились отдельно, а затем объединялись.

Результаты и обсуждение

Результаты районирования акватории Белого моря для поверхностного и придонного горизонтов по сезонам (за исключением зимнего, для которого нет данных – в условиях покрытия моря льдом мониторинг не проводят, ввиду, отсутствия специальных судов) приведены на рис. 2. Вербально-числовая шкала построена для четырёх градаций: сильное недонасыщение, слабое недонасыщение, слабое перенасыщение и сильное перенасыщение. При этом, чтобы упростить восприятие результатов, внутренние границы шкалы были округлены до десятков процентов. Районирование проведено для двух горизонтов: поверхностного и придонного, поскольку процессы на поверхности и у дна в океанах и морях сильно различаются. Объединение их требует специальной методологии, разработка которой выходит за рамки настоящей публикации. В частности, для этого можно

использовать алгоритмы, объединяющие точки, входящие в совпадающие по расположению районы, после чего создавать единую сетку станций.

Результаты моделирования кратчайшего пути нагляднее всего представлять в виде графа, на котором хорошо видна последователь-

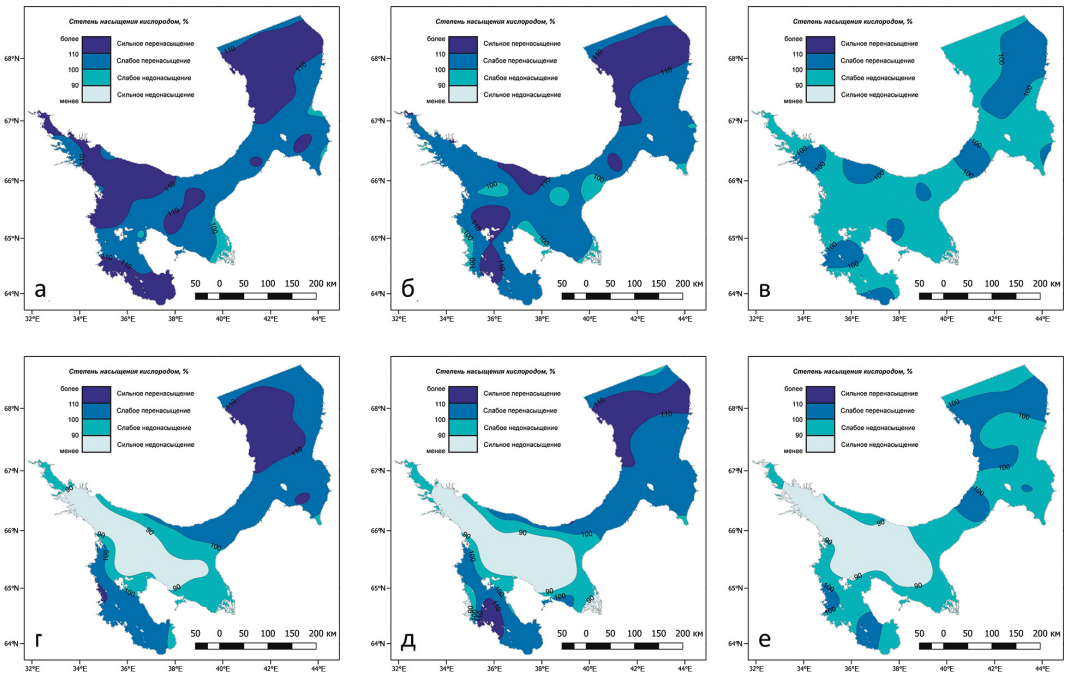

Рис. 2. Районирование акватории Белого моря по среднемноголетней (1979–2014 гг.) степени насыщения вод кислородом (%): а – весной в поверхностном горизонте; б – летом в поверхностном горизонте; в – осенью в поверхностном горизонте; г – весной в придонном горизонте; д – летом в придонном горизонте; е – осенью в придонном горизонте.

ность прохождения точек и количество петель на маршруте. С целью экономии места мы ограничимся только одним фрагментом такого графа (рис. 3); последовательность прохождения точек для сезонных съёмок можно отражать на картосхемах сети мониторинга или же в виде таблиц с координатами станций.

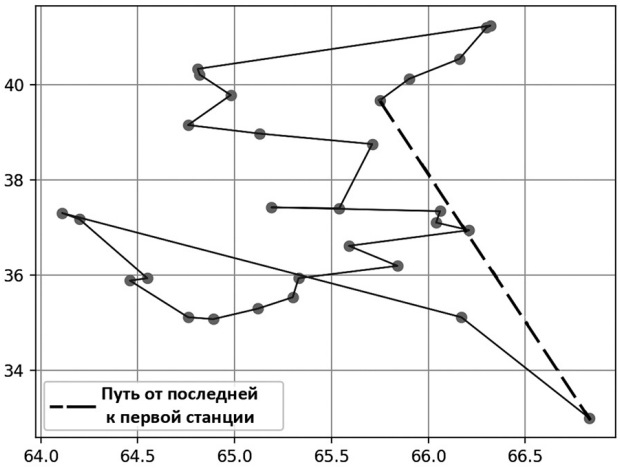

Рис. 3. График кратчайшего маршрута при мониторинге степени насыщения кислородом Белого моря (лето).

Районирование для поверхностного и придонного горизонтов различаются, что, как отмечено выше, вполне естественно. Однако нет никакого смысла организовывать отдельные

экспедиции для мониторинга; для сезонных съёмок целесообразно проводить наблюдения одновременно. На рис. 4 показаны точки наблюдений для этих горизонтов и указан порядок их прохождения.

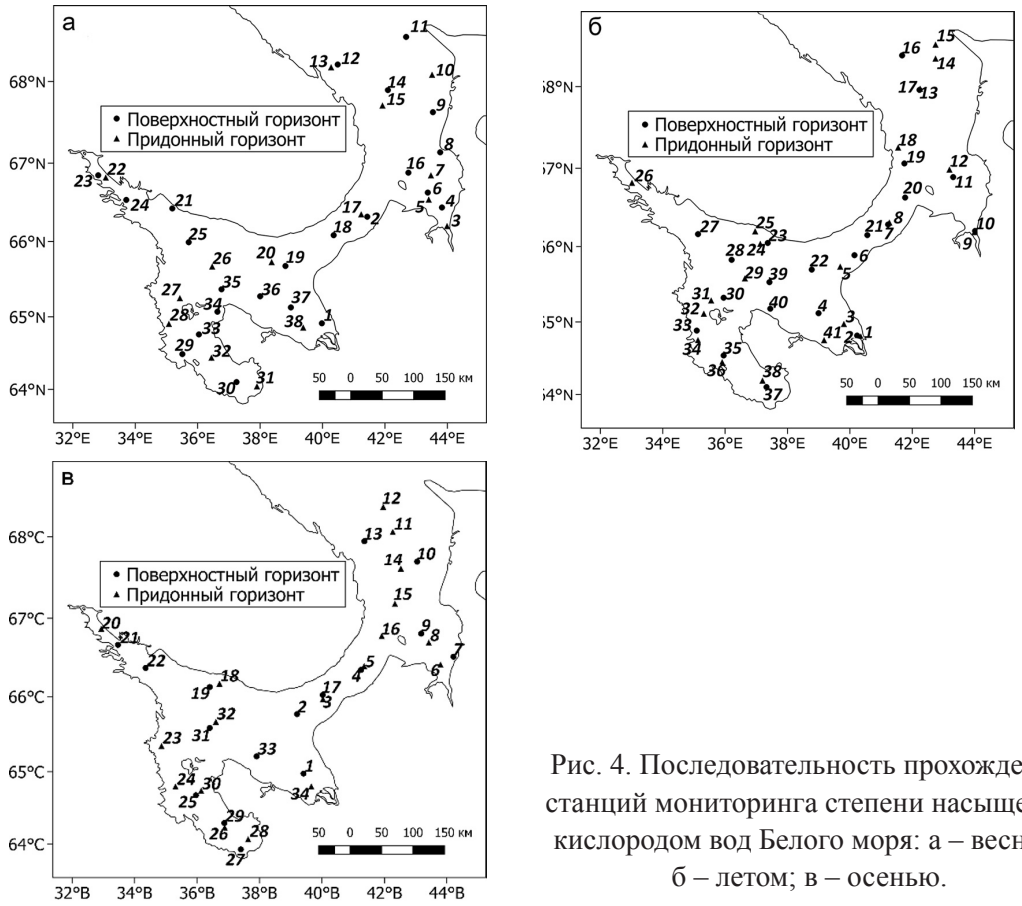

Рис. 4. Последовательность прохождения станций мониторинга степени насыщения кислородом вод Белого моря: а – весной; б – летом; в – осенью.

Новые последовательности производства станций мониторинга в Белом море позволяют сэкономить для стандартных научно-исследовательских судов примерно 15–20% времени. Можно ожидать, что для других арктических морей, площадь акватории которых значительно больше, чем у Белого моря, оптимизация маршрута даст ещё больший выигрыш во времени.

Заключение

Проведённые исследования позволяют сделать вывод, что комбинация районирования акватории с последующей оптимизацией маршрута прохождения станций дают возможность заметно экономить время на осуществление экологического мониторинга.

Работа выполнена в рамках темы Госзадания № 0149-2019-0007 «Современные и древние донные осадки и взвесь Мирового океана – геологическая летопись изменений среды и климата: рассеянное осадочное вещество и донные осадки морей России, Атлантического, Тихого и Северного Ледовитого океанов – литологические, геохимические и микропалеонтологические исследования; изучение загрязнений, палеообстановок и процессов в маргинальных фильтрах рек».

Литература

Алекин О.А., Ляхин Ю.И. Химия океана. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 344 с.

Антипов Е.О., Тутыгин А.Г., Коробов В.Б. Проблемы осуществления транспортировки грузов в Арктической зоне Российской Федерации морским путём // Управленческое консультирование. 2017. № 11. С. 72–79.

Биогеохимия океана. М.: Наука, 1983. 366 с.

Воробьёв Ю.Л., Акимов В.А., Соколов Ю.И. Системные аварии и катастрофы в техносфере России. МЧС России. М.: ФБГУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2012. 308 с.

Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том II: Белое море. Вып. 1: Гидрометеорологические условия. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 241 с.

Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том II: Белое море. Вып. 2: Гидрохимические условия и океанологические основы формирования биологической продуктивности. Л.: Гидрометеоиздат, 1991. 193 с.

Гордеева Н.М., Самойлова И.А. Корректное использование математической модели, называемой задачей коммивояжёра // Актуальные проблемы преподавания математики в техническом ВУЗе. 2018. Т. 6. С. 86–91.

Губайдуллин М.Г., Коробов В.Б. Экологический мониторинг нефтегазодобывающих объектов Европейского Севера России: учебное пособие. Архангельск: ИПЦ С(А) ФУ, 2012. 236 с.

Ежегодные данные о режиме и качестве вод морей и морских устьев рек. Том 2. Часть 1: Белое море. 1979–2014.

Заде Л. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближённых решений. М.: Мир, 1976. 165 с.

Залогин Б.С., Косарев А.Н. Моря. М.: Мысль, 1999. 400 с.

Израэль Ю.А. Экология и контроль состояния природной среды. Л.: Гидрометеоиздат, 1984. 560 с.

Каплин П.А., Леонтьев О.К., Лукьянова С.А., Никифоров Л.Г. Берега. М.: Мысль, 1991. 479 с.

Клювиткин А.А., Политова Н.В., Здоровеннов Р.Э., Кравчишина М.Д., Новигатский А.Н., Филиппов А.С., Чульцова А.Л., Будько Д.Ф. Комплексные исследования Белого моря в июле–августе 2014 г. в экспедиции научно-исследовательского судна «Эколог» // Океанология. 2015. Т. 55. № 3. С. 492–494.

Коновалова Н.В., Коробов В.Б., Васильев Л.Ю. Интерполирование климатических данных при помощи ГИС-технологий // Метеорология и гидрология. 2006. № 5. С. 46–53.

Коробов В.Б., Середкин К.А., Лохов А.С., Нецветаева О.П., Кошелева В.П. Проблемы интерполяции пространственно-неоднородных данных на нерегулярных сетках в Белом море // Геология морей и океанов. Материалы XXI Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. М.: ГЕОС, 2015. Т. 3. С. 203–205.

Лисицын А.П., Шевченко В.П., Немировская И.А., Клювиткин А.А., Кравчишина М.Д., Новигатский А.Н., Новичкова Е.А., Политова Н.В., Филиппов А.С. Развитие четырехмерной океанологии и создание фундаментальных основ комплексного мониторинга морских экосистем (на примере Белого моря) // Физические, геологические и биологические исследования океанов и морей / Отв. ред. С.М. Шаповалов. М.: Научный мир, 2010. С. 559–597.

Лоция Белого моря. СПб.: ГУНиО МО РФ, 1995. 335 с.

Ляхин Ю.И. О взаимосвязи между растворенным кислородом и карбонатной системой в

водах океана // Обмен химическими элементами на границах раздела морской среды. М.: Изд-во Института океанологии АН СССР, 1981. С. 63–82.

Маккавеев П.Н. Особенности связи величины pH и растворённого кислорода на полигоне Чистая Банка в Северном Каспии // Океанология. 2009. Т. 49. № 4. С. 508–515.

Методы гидрохимических исследований основных биогенных элементов. М.: ВНИРО, 1988. 119 с.

Нецветаева О.П., Змётная М.И., Коробов В.Б. Особенности кислородонасыщения вод Белого моря в начале XXI века // Геология морей и океанов. Материалы XXII Международной научной конференции (Школы) по морской геологии. Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН. М.: ГЕОС, 2017. Т. 3. С. 254–258.

Нецветаева О.П., Македонская И.Ю., Коробов В.Б., Змётная М.И. Зависимость кислородонасыщения от содержания хлорофилла «а» в поверхностном слое вод Белого моря // Арктика: экология и экономика. 2018. № 3 (31). С. 31–41.

Политова Н.В., Филиппов А.С., Володин В.Д., Здоровеннов Р.Э., Зуйкова М.В., Зыкова О.А., Кравчишина М.Д., Потапова И.Ю., Таскаев В.Р., Толстиков А.В., Яковлев А.Е. Комплексные исследования системы Белого моря в рейсе научно-исследовательского судна «Эколог» летом 2013 г. // Океанология. 2014. Т. 54. № 6. С. 855–858.

РД 52.10.243-92. Руководство по химическому анализу морских вод. СПб: Гидрометеоиздат, 1993. 128 с.

РД 52.10.736-2010. Объёмная концентрация растворённого кислорода в морских водах. Методика измерений йодометрическим методом. М.: ФГУ ГОИН, 2010. 21 с.

Романкевич Е.А., Ветров А.А., Пересыпкин В.И. Органическое вещество Мирового океана // Геология и геофизика. 2009. Т. 50. №. 4. С. 401–411.

Руководство по гидрологическим работам в океанах и морях. М., 2016. 537 с.

Стюарт И. Величайшие математические задачи: Пер. с англ. М.: Альпина нон-фикшн, 2019. 586 с.

Diaz R.J., Rosenber R. Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems // Science. 2008. Vol. 321. P. 926–929.

Doods W.K. Nutrients and the “dead zone”: The link between nutrient ratios and dissolved oxygen in the northern Gulf of Mexico // Frontiers in Ecology and the Environment. 2006. Vol.4 (4). P. 211–217.

Frieder C.A., Nam S.N., Martz T.R., Levin L.A. High temporal and spatial variability of dissolved oxygen and pH in a nearshore California kelp forest // Biogeosciences. 2012. Vol. 9 (10). P. 3917–3930.

Manasrah R., *Raheed M*., *Badran M*. Relationships between water temperature, nutrients and dissolved oxygen in the northern Gulf of Aqaba, Red Sea // Oceanologia. 2006. Vol. 48 (2). P. 237–253.

Zhu Z., Zhang J., Wu Y., Zhang Y., Lin J., Liu S. Hypoxia off the Changjiang (Yangtze River) Estuary: Oxygen depletion and organic matter decomposition // Marine Chemistry. 2011. Vol. 125 (1–4). P. 108–116.

OPTIMIZATION OF THE WHITE SEA ENVIRONMENTAL MONITORING NETWORK

Netsvetaeva O.P.[1], Korobov V.B.[2], Antipov E.O.[3], Tutygin A.G.[3]

[1]*Russian Arctic National Park, Arkhangelsk, 163000, Russia*
e-mail: netsvetaeva@rus-arc.ru
[2] *Shirshov Institute of Oceanology, Russian Academy of Sciences, Moscow, 117997, Russia,*
e-mail: szoioran@mail.ru
[3] *N. Laverov Federal Center for Integrated Arctic Research, Russian Academy of Science, Arkhangelsk, 163000, Russia, e-mail: antipov_eo@mail.ru;* andgt64@yandex.ru
Submitted 23.03.2020, accepted 10.04.2020

The order of the environmental monitoring stations is very important for marine water areas that characterized by high indentation of the coastline, a significant number of islands and shallows. This article proposes a methodology in order to reduce the number of monitoring stations based on zoning of the water area followed by optimization of the research vessels route. The optimization was performed using the well-known traveling salesman problem algorithm, which was improved for this case. It is shown that this approach allows to reduce the time of one survey by 15–20% on the example of monitoring the oxygen saturation in the White Sea waters.

Keywords: monitoring, White Sea, zoning, travelling salesman problem, optimization.

Acknowledgments: This work was carried out in the framework of State Project No. 0149-2019-0007 “Modern and ancient bottom sediments and a suspension of the World Ocean - a geological record of changes in the environment and climate: Dispersed sediment and bottom sediments of the seas of Russia, the Atlantic, Pacific and Arctic Oceans - lithological, geochemical and micropaleontological studies; Study of pollution, paleo-environments and processes in marginal river filters”.

References

Alekin O.A. and Ljahin Ju.I. Himija okeana (Ocean chemistry). Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984, 344 p.

Antipov E.O., *Tutygin A.G.*, *and Korobov V.B.* Problemy osushhestvlenija transportirovki gruzov v Arkticheskoj zone Rossijskoj Federacii morskim putjom (Problems of Implementation of Freights Transportation in the Arctic Zone of the Russian Federation by Sea). *Upravlencheskoe konsul’tirovanie,* 2017, No. 11, pp. 72–79.

Biogeohimija okeana (Ocean biogeochemistry). Moscow: Nauka, 1983, 366 p.

Diaz R.J. and Rosenber R. Spreading Dead Zones and Consequences for Marine Ecosystems. *Science*, 2008, Vol. 321, pp. 926–929.

Doods W.K. Nutrients and the “dead zone”: The link between nutrient ratios and dissolved oxygen in the northern Gulf of Mexico. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 2006, Vol.4 (4), pp. 211–217.

Ezhegodnye dannye o rezhime i kachestve vod morej i morskih ust’ev rek, Vol. 2, Part 1: Beloe

more (Annual data on the regime and quality of the waters of the seas and estuaries, Vol. 2, Part 1: The White Sea), 1979–2014.

Frieder C.A., Nam S.N., Martz T.R., and Levin L.A. High temporal and spatial variability of dissolved oxygen and pH in a nearshore California kelp forest. *Biogeosciences*, 2012, Vol. 9 (10), pp. 3917–3930.

Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morey SSSR. Vol. 2: Beloe more, No. 1: Gidrometeorologicheskie uslovija (Hydrometeorology and hydrochemistry of the USSR seas in 10 v., Vol. II: White sea. No. 1: Hydrometeorological conditions), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991, 241 p.

Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morey SSSR. Vol. 2: Beloe more. No. 2: Gidrokhimicheskie usloviya i okeanologicheskie osnovy formirovaniya bioproduktivnosti (Hydrometeorology and hydrochemistry of the USSR seas in 10 vol. Vol. II: White sea. No. 2: Hydrochemical conditions and oceanological foundations of bioproductivity formation), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1991, 193 p.

Gordeeva N.M. and Samojlova I.A. Korrektnoe ispol'zovanie matematicheskoj modeli, nazyvaemoj zadachej kommivojazhjora (The correct use of a mathematical model called the travelling salesman problem). *Aktual'nye problemy prepodavanija matematiki v tehnicheskom VUZe*, 2018, Vol. 6, pp. 86–91.

Gubajdullin M.G. and Korobov V.B. Jekologicheskij monitoring neftegazodobyvajushih ob'ektov Evropejskogo Severa Rossii (Environmental monitoring of oil and gas production facilities in the European North of Russia), Arkhangelsk: IPC S(A)FU, 2012, 236 p.

Izrajel' Ju.A. Ekologija i kontrol' sostojanija prirodnoj sredy (Ecology and environmental monitoring), Leningrad: Gidrometeoizdat, 1984, 560 p.

Kaplin P.A., *Leont'ev O.K.*, *Luk'janova S.A., and Nikiforov L.G.* Berega (Shores), Moscow: Mysl', 1991, 479 p.

Klyuvitkin A.A., *Politova N.V.*, *Kravchishina M.D.*, *Novigatsky A.N.*, *Filippov A.S.*, *Bud'ko D.F.*, *Zdorovennov R.E.*, *and Chul'tsova A.L.* Comprehensive studies of the White Sea in July to August 2014 during the expedition of the research vessel Ekolog. *Oceanology*, 2015, Vol. 55, No. 3, pp. 445–448.

Konovalova N.V., *Korobov V.B.*, *and Vasil'ev L.Ju.* Interpolirovanie klimaticheskih dannyh pri pomoshhi GIS-tehnologij (Interpolation of climate data using GIS technology). *Meteorologija i gidrologija,* 2006, No. 5, pp. 46–53.

Korobov V.B., *Seredkin K.A.*, *Lokhov A.S.*, *Netsvetaeva O.P.*, *and Kosheleva V.P.* Problemy interpolyatsii prostranstvenno-neodnorodnykh dannykh na neregulyarnykh setkakh v Belom more (Problems of interpolation of spatially inhomogeneous data on irregular grids in the White Sea), Geologiya morey i okeanov: Materialy XXI Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (Shkoly) po morskoy geologii (Geology of the Seas and Oceans: Proceedings of the XXI International Scientific Conference (School) on Marine Geology), Moscow: GEOS, 2015, Vol. 3, pp. 203–205.

Lisicyn A.P., *Shevchenko V.P.*, *Nemirovskaja I.A.*, *Kljuvitkin A.A.*, *Kravchishina M.D.*, *Novigatskij A.N.*, *Novichkova E.A.*, *Politova N.V.*, *and Filippov A.S.* Razvitie chetyrehmernoj okeanologii i sozdanie fundamental'nyh osnov kompleksnogo monitoringa morskih jekosistem (na primere Belogo morja) (The development of four-dimensional oceanology and the creation of the fundamental foundations of integrated monitoring of marine ecosystems (for example, the White Sea). Fizicheskie, geologicheskie i biologicheskie issledovanija okeanov i morej, Moscow: Nauchnyj mir, 2010, pp. 559–597.

Ljahin Ju.I. O vzaimosvjazi mezhdu rastvorennym kislorodom i karbonatnoj sistemoj v vodah okeana (On the relationship between dissolved oxygen and the carbonate system in ocean

waters), Obmen himicheskimi jelementami na granicah razdela morskoj sredy. Moscow: Izd-vo Instituta okeanologii AN SSSR, 1981, pp. 63–82.

Locija Belogo morja (Pilotage of the White Sea). Saint Petersburg: GUNiO MO RF, 1995, 335 p.

Makkaveev P.N. The features of the correlation between the pH values and the dissolved oxygen at the Chistaya Balka test area in the Northern Caspian Sea. *Oceanology*, 2009, Vol. 49, No. 4, pp. 508–515.

Manasrah R., *Raheed M.*, *and Badran M.* Relationships between water temperature, nutrients and dissolved oxygen in the northern Gulf of Aqaba, Red Sea. *Oceanologia*, 2006, Vol. 48 (2), pp. 237–253.

Metody gidrohimicheskih issledovanij osnovnyh biogennyh jelementov (Methods of hydrochemical studies of the main biogenic elements). Moscow: VNIRO, 1988, 119 p.

Netsvetaeva O.P., Zmjotnaja M.I., *and Korobov V.B.* Osobennosti kislorodonasyshcheniya vod Belogo morya v nachale XXI veka (Peculiarities of the oxygen saturation of the waters of the White Sea at the beginning of the XXI century), Geologiya morey i okeanov: Materialy XXII Mezhdunarodnoy nauchnoy konferentsii (Shkoly) po morskoy geologii (Geology of the Seas and Oceans: Proceedings of the XXII International Scientific Conference (School) on Marine Geology). Moscow: GEOS, 2017, Vol. 3, pp. 254–258.

Netsvetaeva O.P., *Makedonskaja I.Ju., Korobov V.B.*, *and Zmjotnaja M.I.* Zavisimost' kislorodonasyshhenija ot soderzhanija hlorofilla «a» v poverhnostnom sloe vod Belogo morja, Relationship between oxygen saturation and the «a» chlorophyll content in the surface layer of the White Sea). *Arktika: jekologija i jekonomika,* 2018, No. 3 (31), pp. 31–41.

Politova N.V., *Filippov A.S.*, *Zuikova M.V.*, *Zykova O.A.*, *Kravchishina M.D.*, *Taskaev V.R.*, *Volodin V.D.*, *Zdorovennov R.E.*, *Potapova I.Y.*, *Tolstikov A.V.*, *and Yakovlev A.E.* Multidisciplinary investigations of the White Sea System in the expedition of the R/V Ekolog in the summer of 2013. *Oceanology*, 2014, Vol. 54, No. 6, pp. 808–811.

RD 52.10.243-92. Russian Federation standard, Saint Petersburg: Gidrometeoizdat, 1993, 128 p.

RD 52.10.736-2010. Russian Federation standard, Moscow: FGU GOIN, 2010, 21 p.

Romankevich E.A., *Vetrov A.A.*, *and Peresypkin V.I.* Organicheskoe veshhestvo Mirovogo okeana (Organic matter of the oceans). *Geologija i geofizika*, 2009, Vol. 50, No. 4, pp. 401–411.

Rukovodstvo po gidrologicheskim rabotam v okeanah i morjah. Guide to hydrological work in the oceans and seas, Moscow, 2016, 537 p.

Stewart I. The Great Mathematical Problems: Marvels and Mysteries of Mathematics. Moscow: Al'pina non-fikshn, 2019, 586 p.

Vorob'jov Ju.L., Akimov V.A., *and* Sokolov *Ju.I.* Sistemnye avarii i katastrofy v tehnosfere Rossii. MChS Rossii (Systemic accidents and disasters in the technosphere of Russia. Russian Emergency Situations Ministry), Moscow: FBGU VNII GOChS (FC), 2012, 308 p.

Zade L. Ponjatie lingvisticheskoj peremennoj i ego primenenie k prinjatiju priblizhjonnyh reshenij (The concept of a linguistic variable and its application to making approximate decisions). Moscow: Mir, 1976, 165 p.

Zalogin B.S. and Kosarev A.N. Morja (Seas), Moscow: Mysl', 1999, 400 p.

Zhu Z., Zhang J., Wu Y., Zhang Y., Lin J., and Liu S. Hypoxia off the Changjiang (Yangtze River) Estuary: Oxygen depletion and organic matter decomposition. *Marine Chemistry*, 2011, Vol. 125 (1–4), pp. 108–116.