

## ИСПОЛЬЗОВАНИЕ МНОГОКРИТЕРИАЛЬНОГО ПОДХОДА И МЕТОДОВ НЕЧЕТКОЙ МАТЕМАТИКИ ДЛЯ ОЦЕНКИ УСЛОВИЙ ОСВОЕНИЯ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АРКТИЧЕСКИХ МОРЕЙ НА ПРИМЕРЕ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ БАРЕНЦЕВА МОРЯ

К. Н. Пивоваров

ФГБОУ ВО Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина (Москва, Российская Федерация)

А. Б. Золотухин

ФГБОУ ВО Российский государственный университет нефти и газа (национальный исследовательский университет) имени И. М. Губкина, ООО МИП ГУ «Институт арктических нефтегазовых технологий» (Москва, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 2 апреля 2018 г.

*Предложен подход к оценке технической доступности арктических морей, характеризующийся многокритериальностью и основывающийся на методах нечеткой математики. Авторам удалось построить наглядную карту технической доступности акватории юго-восточной части Баренцева моря, а также предложить поэтапное освоение данного региона в целом. Построение подобных карт дает возможность системно подходить к вопросу разработки ресурсов шельфа в средне- и долгосрочной перспективе, а также позволяет проводить оценку эффективности существующих технологий освоения.*

**Ключевые слова:** Арктика, Печорское море, техническая доступность, нечеткая логика, нечеткая математика, классификация, кластеризация, условия освоения, многокритериальный подход, ранжирование, карта, прогнозирование.

### Введение

Современное состояние российской морской техники (как, впрочем, и мировой) не позволяет приступить к полномасштабной разработке арктических запасов. Первым серьезным шагом России к освоению шельфа Арктики явилась работа на Приразломном месторождении. Решение чрезвычайно сложных задач, связанных с этим месторождением, находящихся в Печорском море, доказало принципиальную возможность успеха, и список нефтегазовых структур — кандидатов на освоение насчитывает уже не один десяток наименований. Развитие этого региона приведет к подъему многих отраслей промышленности, появлению новых рабочих мест, строительству заводов, перерабатывающих мощностей и промышленных баз. Это станет основой будущего прогресса регионов Крайнего Севера, что, в свою

очередь, сможет обеспечить более устойчивый рост всей российской экономики в целом.

Суровый арктический климат и высокая экологическая чувствительность требуют осторожного и особенно тщательного подхода к проектированию и обустройству региона на всех стадиях освоения. О разработке нового подхода к прогнозированию<sup>1</sup>, учитывающего специфику и сложность местных условий, пойдет речь ниже.

### Методология классификации арктических месторождений

Малая изученность арктического региона вкрупне с большой неопределенностью имеющихся данных обуславливает применение для задач проектирования и прогнозирования методов нечеткой логики,

<sup>1</sup> Подробнее с методами кластеризации и ранжирования технологической доступности арктических морей можно ознакомиться в [1].

которая в силу своих особенностей является эффективным инструментом для учета и отображения неопределенностей и неточностей реального мира и позволяет построить модель, наиболее адекватную реальности [2].

Другим важным свойством рассматриваемого подхода должна быть его многокритериальность при оценке сложности условий, подразумевающая одновременный учет и анализ множества факторов.

В данной работе рассматривается задача, связанная с оценкой сложности освоения различных акваторий арктических морей. Выбраны десять основных критериев для итоговой оценки. Отметим, что эти критерии не являются единственно возможными и отражают скорее предпочтения или точку зрения авторов. Однако в совокупности они дают, на наш взгляд, правильное описание сложной внешней среды для оценки условий освоения природных ресурсов северных акваторий.

**1. Гидрометеорологические условия.** Этот фактор необходим для общего понимания того, насколько сложны гидрометеорологические условия региона, в том числе сложность условий работы персонала. Это один из самых емких факторов, включающий в себя целый ряд подкритериев, таких как максимальные и средние температуры воздуха, волновая и ветровая характеристики региона, частота штормов, изменения уровня моря и некоторые другие. Оцифровка значений каждого из подкритериев осуществляется на основе сравнительно-описательной характеристики участков морей (легкие, средние и тяжелые условия), которая, в свою очередь, основывается на анализе многолетних наблюдений ученых различных направлений. Например, к категории с легкими условиями относятся участки морей, где среднегодовые температуры приповерхностного воздуха не опускаются ниже  $-5...-10^{\circ}\text{C}$ , средние волнения моря не превышают 2—3 м, штормы редки, ветры не достигают больших скоростей и т. д. При изменении средних показателей меняется и категория, к которой относится тот или иной участок моря.

**2. Ледовые условия.** В основу этого параметра берутся следующие характеристики: тип льда, его средняя толщина, а также максимальная, средняя и минимальная зафиксированные кромки распространения льда за историю наблюдений в регионе.

**3. Айсберги.** Этот фактор основан на анализе исторических данных многолетних наблюдений ледовой обстановки и оценивается как вероятностное распределение айсбергов в акваториях. Стоит оговориться: данный подход не может полностью описать вероятность столкновения айсберга с платформой, так как суммарное движение большого числа айсбергов в достаточной степени случайно и хаотично [3].

**4. Газогидраты.** Этот фактор указывает на вероятность наличия придонных и криогенных газогидратов в толщах вечной мерзлоты, а также на

предполагаемые мощности их скоплений в отдельных структурах и возможные последствия нарушения их целостности или термобарических условий их существования. Считается, что чем выше мощность газогидратных образований, тем большие сложности они могут вызвать на стадии разведки и особенно освоения месторождений нефти и газа.

**5. Межледовый период.** Средняя продолжительность открытой воды в акватории существенно влияет на поисковое и разведочное бурение, которое обычно проводят в свободный ото льда период. Помимо бурения разведочных и поисковых скважин в межледовый период также проводятся другие процедуры: отгрузка сырья в наливные танкеры (ледового класса), установка систем подводно-добычных комплексов и другого оборудования на дно, обслуживание этих комплексов, мониторинг состояния окружающей среды, очистка акватории от различных загрязнений и многое другое.

**6. Глубины.** Средняя толща воды в акватории — одна из ключевых характеристик при описании морей, так как от нее существенно зависят тип и вид морских нефтегазопромысловых сооружений. В теории проблемы, связанные с глубиной, нарастают по экспоненте с ее ростом. Однако из практики хозяйственной деятельности известно, что на небольших глубинах и в прибрежных районах Арктики существует ряд сложностей, не свойственных более глубоководным районам: вспахивание дна стамухами и береговая эрозия [4]. Поэтому в настоящем исследовании учитывается немонотонность функциональной зависимости сложности освоения от глубины моря. При этом предполагается, что наименее сложными для освоения регионами являются акватории с глубиной 30—40 м.

**7. Удаленность от берега.** Этот параметр рассчитывается как расстояние от определенной точки акватории до береговой линии. Фактор используется для оценки вероятности проводки наикратчайшего (прямолинейного) трубопровода с выходом на сушу, а также для оценки возможности экстренной эвакуации персонала с морского нефтегазового сооружения на берег. Удаленные от берега акватории характеризуются отсутствием инфраструктуры, спутникового покрытия и возможности быстрого аварийного реагирования [5]. С другой стороны, прибрежные акватории экологически более чувствительны к различным воздействиям.

**8. Удаленность от баз снабжения.** В условиях Арктики логистическая составляющая проекта является одной из ключевых и сложнейших задач, от которой зависит не только процесс бесперебойной и эффективной добычи углеводородных ресурсов, но и жизнь вовлеченного в него персонала. Расстояние между исследуемой акваторией и базой снабжения играет значимую роль при предварительной оценке работ по обеспечению производства необходимыми оборудованием, материалами и рабочей силой.

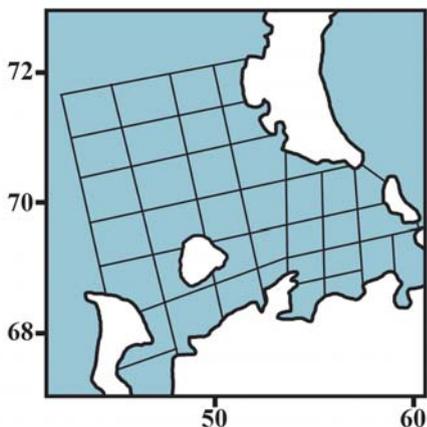
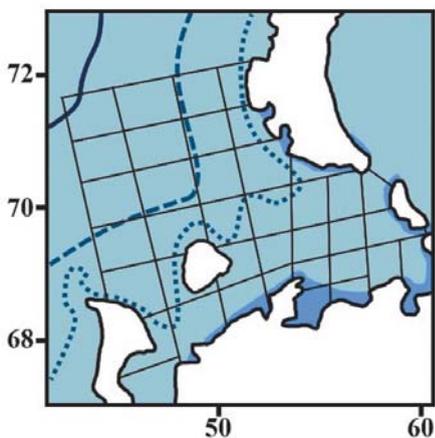


Рис. 1. Разделение акватории Печорского моря по зонам (здесь и далее построение выполнено К. Пивоваровым, если не указано иное)



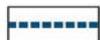
-  зона развития припая
-  максимальная граница распространения дрейфующих льдов
-  средняя граница распространения дрейфующих льдов
-  минимальная граница распространения дрейфующих льдов

Рис. 2. Карта региона с ледяным покровом в период максимального развития (апрель) (по данным работы [12])

### 9. Животный и растительный мир акватории.

Этот параметр учитывает разнообразие видов флоры и фауны арктических морей, а также его примерные количественные показатели (плотность распространения и численность популяций) и основывается на данных многолетних исследований.

**10. Потенциальные экологические угрозы при аварийном загрязнении акватории.** Это комплексный фактор, описывающий возможную

степень тяжести нарушения экологического баланса при чрезвычайных ситуациях. Включение двух экологических критериев в общий анализ обусловлено тем, что бережное отношение к крайне чувствительной северной экосистеме и понимание возможных последствий нарушения природного баланса являются основополагающими факторами для обеспечения добросовестного и ответственного отношения к освоению арктических морей.

Все данные по описанным выше характеристикам берутся из целого ряда проверенных и надежных источников. В случае отсутствия или недостаточности информации используется метод экспертных оценок.

Выбранные факторы имеют разную природу, они неоднородны и имеют различные размерности: одни из них выражаются в месяцах, другие — в метрах, километрах и даже абстрактных понятиях «сложности» или «легкости» условий. В решении таких слабоформализуемых задач эффективным средством оказывается теория нечетких множеств [2; 4], когда численным значениям любого из параметров ставится в соответствие значение так называемой функции принадлежности некоему нечеткому множеству, которое в рассматриваемом случае характеризует степень сложности условий освоения месторождения по выбранному критерию. Мы также использовали веса критериев, показывающие важность какого-либо параметра для общей картины анализа<sup>2</sup>.

Веса параметров исследователь может варьировать в зависимости от конкретной проблемы, что делает подход более гибким, унифицирует методологию и расширяет возможности ее применения. В данной работе при получении общей картины сложности условий были выбраны весовые показатели, рассчитанные по методу попарного сравнения<sup>3</sup>.

### Нечеткая кластеризация Печорского моря

Рассмотрим методику нечеткой кластеризации на примере юго-восточной части Баренцева моря, включающего в себя Печорское море. Для подробного анализа рассматриваемая акватория была разделена на приблизительно одинаковые по площади районы (75×75 км) (рис. 1). Остановимся более подробно на анализе имеющихся данных по исследуемой части Баренцева моря.

**Гидрометеорологические условия.** Климат полярный морской, со средней температурой приповерхностного воздуха в январе –15...–20°С и в июле 5—10°С. В среднем в году насчитывается более 200 дней с устойчивой температурой ниже 0°С [8]. Ветры сильные с порывами до 37 м/с, и по

<sup>2</sup> Более подробно об определении коэффициента значимости можно прочитать в [6] и др.

<sup>3</sup> Более подробно с методом попарного сравнения можно познакомиться в [7] и др.

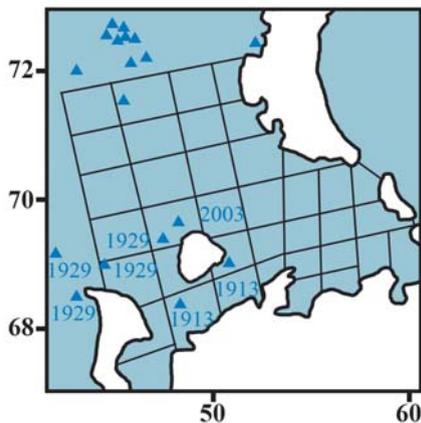


Рис. 3. Случаи наиболее южных фиксаций айсбергов в Баренцевом море (по данным [14])

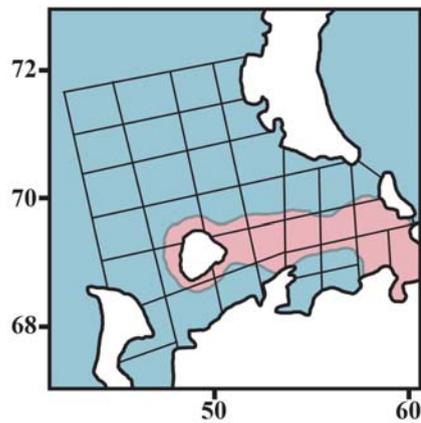
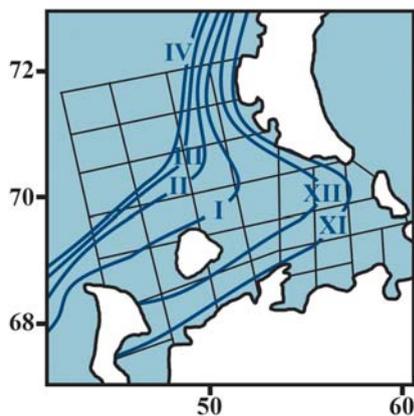
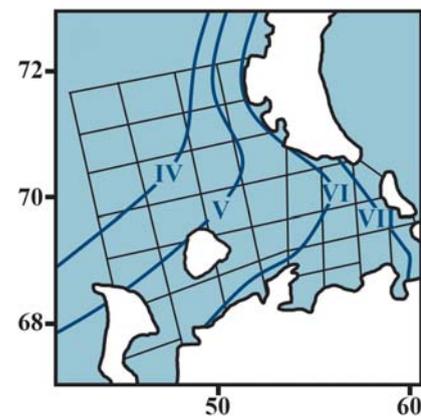


Рис. 4. Области возможного образования скопления придонных газовых гидратов (по данным [15])



а



б

Рис. 5. Среднемесячное положение границ распространения льда в юго-восточной части Баренцева моря в период замерзания (а) и таяния (б) по данным 1950–2010 гг. Римскими цифрами обозначены месяцы [11]

российскому территориальному делению, представленному в СНиП 2.01.07-85, это море относится к сложной 7-й зоне (из 8) [9]. В октябре-ноябре могут возникать волны высотой до 12 м. Летом высота волны очень редко превышает 3–4 м [10]. В целом мы считаем, что гидрометеорологические условия данного региона являются средними по сложности.

**Ледовые условия** выбранной акватории довольно суровы, но в среднем ледовые образования представлены местным однолетним типом льда со средней толщиной порядка 1 м и максимальными значениями 1,5 м<sup>4</sup>. При этом толщина наслоенного льда может достигать 2,5 м. Лед распространяется с востока на запад, его сплоченность в восточных частях выше, чем в западной [11]. Припай в основном находится в прибрежных районах Печорского моря (рис. 2). На границе припая и дрейфующего

льда приблизительно в 10–15 км от берега располагается зона взаимодействия, где происходит интенсивное образование гряд торосов и стамух. Ширина зоны взаимодействия составляет от нескольких сотен метров до нескольких километров [10]. Зона развития борозд ледового выпаживания охватывает все прибрежное мелководье от берега до изобаты 25 м, глубина ледового выпаживания морского дна может достигать 1,5 м [13].

**Айсберги** за историю их наблюдений всего несколько раз появлялись в рассматриваемом нами районе в период с 1913 по 2007 гг. [14], поэтому вероятность их появления в будущем невелика, хотя и не нулевая (рис. 3).

**Газогидраты** в юго-восточной части Баренцева моря встречаются в основном в Печорском море, и их толщ не превышают 200–400 м [15] (рис. 4).

**Межледовый период** уменьшается по направлению с запада на восток и с севера на юг. Его продолжительность достигает четырех месяцев в восточной оконечности Печорского моря [16; 10; 11] (рис. 5).

<sup>4</sup> [http://www.aari.ru/resources/a0013\\_17/barents/atlas\\_barents\\_sea/\\_Atlas\\_Barenc\\_Sea\\_seasons/text/Barenc.htm](http://www.aari.ru/resources/a0013_17/barents/atlas_barents_sea/_Atlas_Barenc_Sea_seasons/text/Barenc.htm).

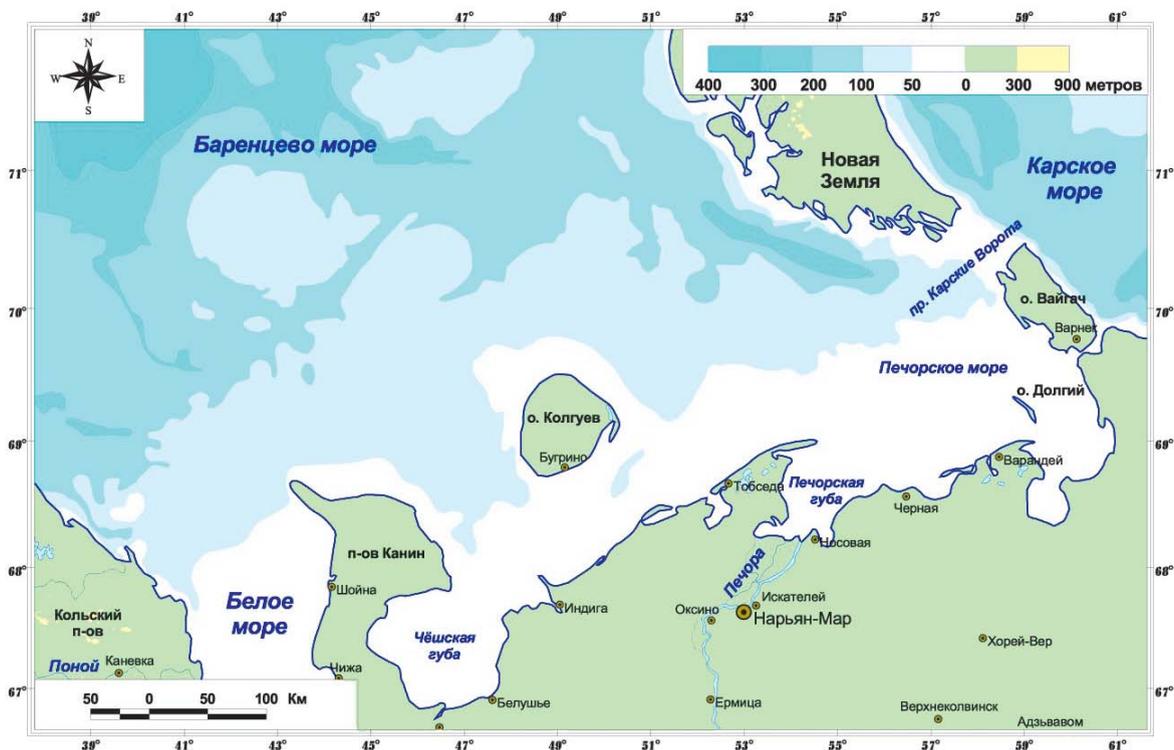


Рис. 6. Физико-географическая карта Печорского моря [18]

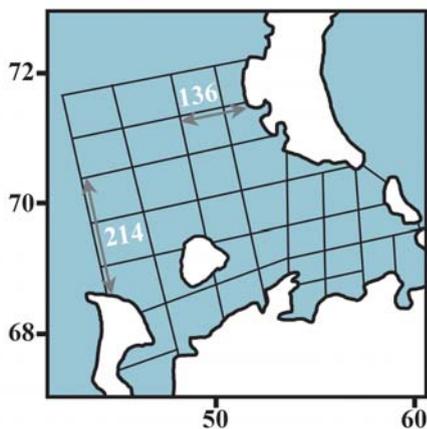


Рис. 7. Удаленность акваторий от берега

**Глубины.** Юго-восточная часть Баренцева моря мелководна с постепенно увеличивающимися глубинами от материкового берега в меридиональном направлении [17]. Так как в каждой из выделенных нами зон могут присутствовать различные глубины с резкими перепадами, то для всей зоны берется та, что наиболее распространена в ней. Самыми благоприятными по условиям для добычи в этом регионе участками являются акватории Печорского моря со средними глубинами порядка 20—30 и 50—60 м (рис. 6).

**Удаленность от берега** для разных частей акваторий в среднем не превышает 100—150 км (рис. 7).

**Удаленность от баз снабжения.** Наиболее близкими портами являются Варандей, Нарьян-Мар, Терiberна и Мурманск, из которых поселок Варандей расположен наиболее близко к рассматриваемой части Баренцева моря (до 100 км), остальные же зоны расположены в пределах до 500 км (рис. 8).

**Флора и фауна** моря богаты как в качественном, так и в количественном выражении: богатые бентосные сообщества (более 600 видов), множество видов рыб (более 100), большое разнообразие птиц и ключевые орнитологические территории, несколько природоохранных заповедников и заказников<sup>5</sup> (рис. 9 и 10). Из млекопитающих встречаются моржи, тюлени, здесь происходит зимовка белух, а припай в Печорской губе является местом размножения кольчатых нерп [17]. Данную акваторию населяют многие животные, занесенные в Красные книги федерального и регионального значения: белоклювая гагара, тундровый лебедь, белая чайка, беркут, кречет, орлан-белохвост, атлантический морж, белый медведь, беломордый дельфин, морская свинья и др. [19]. Численность многих из этих видов в настоящее время минимальна, они нуждаются в защите от негативного антропогенного воздействия.

**Потенциальные экологические угрозы при аварийном загрязнении акватории.** Экологические риски и тяжесть их последствий в рассматриваемой акватории чрезвычайно велики. Это

<sup>5</sup> <http://www.wwf.ru>.



Рис. 8. Удаленность акваторий от баз снабжения

объясняется обилием и разнообразием животного и растительного мира (см. рис. 9), наличием в непосредственной близости экологически чувствительных природных заказников и заповедников (см. рис. 10), а также достаточно замкнутым пространством данной территории и круговыми течениями в ней, относительно сложными ледовыми и гидрометеорологическими условиями. При аварийных ситуациях может быть загрязнена как сама река Печора (материковые разработки), так и обширные водные пространства акватории. Загрязнение нефтью

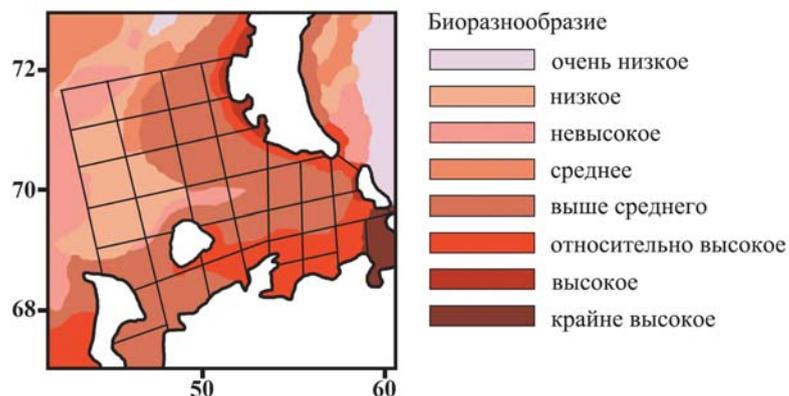


Рис. 9. Биоразнообразие Печорского моря (выполнено по данным [19])

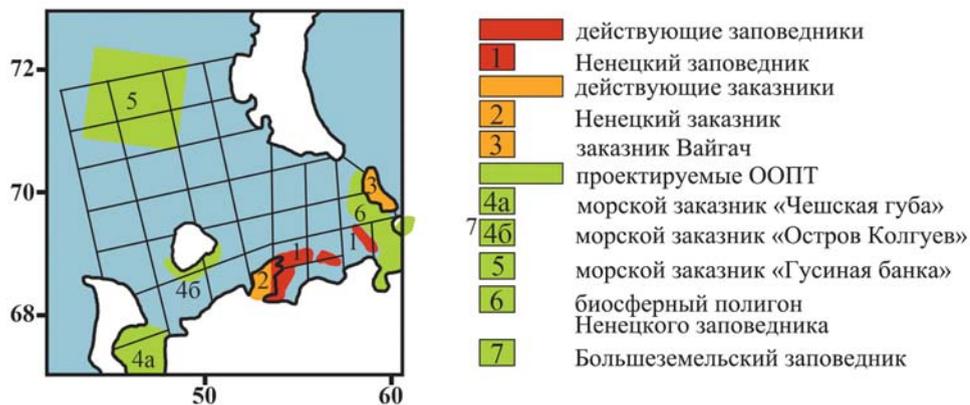


Рис. 10. Действующие и предполагаемые особо охраняемые природные территории (ООПТ). Построение выполнено по данным информационного портала «Прозрачный мир» (Нефтегазовые угрозы Баренцевоморскому сектору Арктики. – URL: <http://www.transparentworld.ru/>)

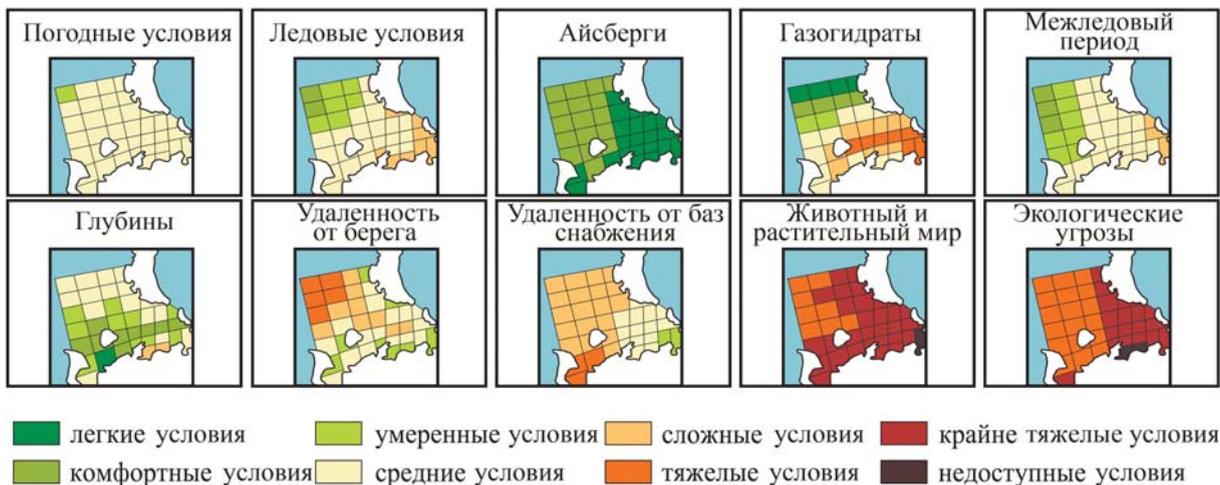


Рис. 11. Характеристики Печорского моря

Таблица 1. Условная шкала оценок для сравнения акваторий

Оценка по классу	Удаленность от берега, км
1,0	Менее 5
0,9	5—10
0,8	10—20
0,7	20—50
0,6	50—75
0,5	75—100
0,4	100—200
0,3	200—300
0,2	300—500
0,1	Более 500

в период, когда акватория имеет ледовый покров, будет иметь непредсказуемые последствия.

Анализ этих и других данных, описывающих исследуемую акваторию, позволил составить сводную таблицу характеристик всех участков, которая для удобства подсчета вводится в специально разработанную авторами программу в среде MATLAB. Более подробно процедура составления сводной таблицы характеристик будет описана в последующих работах. Здесь же укажем результат оценки по одному из критериев, а именно оценку удаленности акваторий от береговой линии (табл. 1). Как следует из таблицы, акватории, располагающиеся ближе к берегу, имеют более высокий класс оценки, нежели удаленные участки моря.

Используемые в программе методы нечеткой кластеризации разделяют степень сложности условий освоения для добычи и разведки на восемь групп. Так, первая группа объединяет участки акваторий с наилучшими показателями оценок, а восьмая включает наисложнейшие для освоения регионы Арктики. Каждая группа описывается четко определенными рамками числовых значений из интервала [0, 1], который разделен на 8 подынтервалов шириной 0,125 каждый (рис. 11). Таким образом, восьмая группа с наихудшими параметрами включает в себя значения из интервала [0, 0,125], а первая с наилучшими — [0,875, 1].

На рис. 11 изображены значения каждого фактора в каждой зоне, дальнейшее объединение и анализ всех параметров осуществляется с помощью методов нечеткой логики и дает общую картину технической доступности исследуемого региона по совокупности рассмотренных критериев.

Для построения карты технической доступности авторы из существующих подходов к нечеткой систематизации данных выбрали три метода<sup>6</sup>:

- Взвешенная геометрическая оценка (ВГО). Метод основан на способе агрегирования многокритериальной оценки в однокритериальную с помощью соотношения

$$\mu_{\Lambda_0} = \mu_1^{\omega_1} \mu_2^{\omega_2} \dots \mu_n^{\omega_n}.$$

- Взвешенная арифметическая оценка (ВАО), основанная на соотношении

$$\mu_{\Lambda_1} = \sum_{i=1}^n (\omega_i \mu_i).$$

<sup>6</sup> Более подробно с подходами нечеткой систематизации данных можно познакомиться в [20] и др.

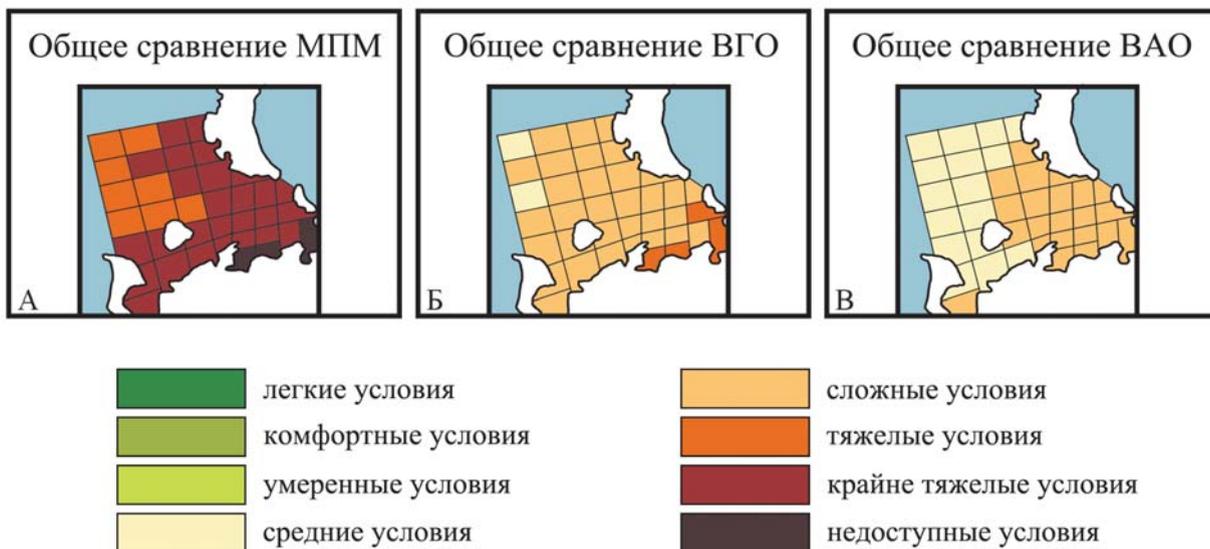


Рис. 12. Карты доступности и сложности освоения шельфа юго-восточной части Баренцева моря

- Метод пересечения множеств (присвоение минимального значения из совокупности всех параметров) (МПП):

$$\mu_{A_2} = \min_{i=1}^n (\mu_i).$$

В приведенных соотношениях  $\mu_i$  — оценка по  $i$ -му критерию,  $\omega_i$  — коэффициент значимости  $i$ -го критерия.

Результаты, получаемые при использовании этих методов, по степени «мягкости» оценки можно расставить в следующем порядке: (а) взвешенная арифметическая оценка с наиболее оптимистичными результатами, (б) взвешенная геометрическая оценка, (в) оценка, основанная на методе пересечения множеств, дающая наиболее пессимистичный результат.

### Нечеткое ранжирование

Помимо разделения зон (акваторий) на кластеры по уровням доступности разработанный авторами подход позволяет ранжировать рассматриваемые участки морей по технической доступности. Эта задача решается с помощью метода нечеткого ранжирования<sup>7</sup>.

Итоговые результаты описанных построений отражены на рис. 12, где кластеризация по методу пересечения нечетких множеств показана на карте А, по взвешенной геометрической оценке — на карте Б, по взвешенной арифметической оценке — на карте В.

Как следует из этих карт, одни и те же участки моря могут быть отнесены к разным кластерам в зависимости от выбранного метода построения. При

этом, как упоминалось выше, метод пересечения множеств (см. рис. 12, карта А) дает самые строгие (наиболее пессимистичные) результаты. Использование метода пересечения для частного анализа технической доступности очень важно с целью общего понимания ситуации в целом, так как всегда стоит помнить о том, что даже в самом благоприятном для добычи районе значение одного из параметров может оказаться недопустимо низким, что может значительно осложнить работы по освоению. Нетрудно заметить, что карта пересечения множеств в точности совпадают с результатами, отображенными на рис. 11 (карта «Животный и растительный мир»), так как именно они явились определяющими при данном методе построения, тем самым еще раз доказав важность этого параметра в общей оценке. Метод, основанный на использовании взвешенной геометрической оценки, менее строг, чем предыдущий, поскольку в совокупной оценке участвуют все параметры, а не только принимающий минимальное значение, однако его сходство с первой оценкой заключается в том, что при нулевом (или недопустимо низком) значении технической доступности хотя бы по одному из участвующих в оценке параметров совокупная оценка также становится нулевой (или неприемлемо низкой). Метод, основанный на использовании взвешенной арифметической оценки, дает наиболее оптимистичные результаты, поскольку даже при нулевом значении технической доступности по одному или даже нескольким параметрам совокупная оценка может оказаться ненулевой и даже приемлемой.

Из представленных на рис. 12 результатов следует, что наиболее благоприятными для добычи углеводородов являются северо-западные и западные участки рассматриваемой акватории, где ледовые и другие условия менее жестки, чем в ее

<sup>7</sup> Более подробно с методом нечеткого ранжирования можно познакомиться в [20] и др.

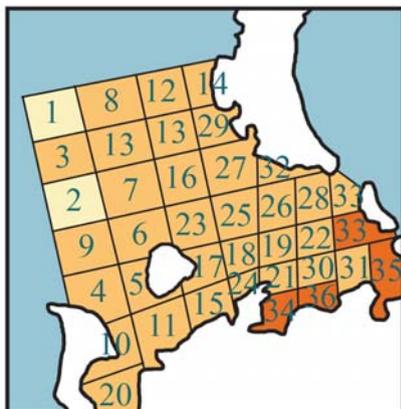


Рис. 13. Нечеткое ранжирование участков освоения шельфа Баренцева моря

юго-восточной части. Таким образом, освоение этой акватории было бы целесообразно начать с благоприятных участков, постепенно переходя на более сложные зоны, что отображается и в результатах нечеткого ранжирования (рис. 13)<sup>8</sup>.

### Заключение

В статье предложен один из возможных подходов к оценке технической доступности арктических морей с целью освоения углеводородных ресурсов. В результате детального анализа имеющейся информации и использования специальной методологии удалось не только построить наглядную карту технической доступности (сложности условий освоения) акватории юго-восточной части Баренцева моря, но и предложить постепенное и поэтапное освоение указанного региона в целом. Построение подобных карт дает возможность системно подходить к вопросу освоения ресурсов шельфа в средне- и долгосрочной перспективе. Эта системность базируется на оценках ресурсной базы, наличия рынков сбыта, природно-климатических условий, уровня развития технологий и наличия инфраструктуры. В данной статье оценка сделана для очень важной для России части акватории Баренцева моря, о которой имеется достаточно подробная информация по всем рассмотренным в работе критериям. С другой стороны, этот выбор предопределен тем обстоятельством, что по этой акватории уже имеются оценки, выполненные рядом исследователей с использованием различных подходов, что позволяет сравнивать полученные нами результаты с ранее опубликованными<sup>9</sup>.

Подобная оценка проведена авторами не только для шельфа юго-восточной части Баренцева моря,

но и для всей его акватории, а также для других арктических морей Российской Федерации, частей Каспийского и Охотского морей, и эти результаты скоро будут опубликованы. Такой подход позволяет оценить степень доступности арктических морей и в совокупности с картой перспективных запасов углеводородов дает средство оценки наиболее целесообразной и эффективной последовательности поисково-разведочных работ и ввода месторождений в разработку, а также позволяет проводить оценку эффективности существующих технологий освоения углеводородных ресурсов.

### Литература

1. Пивоваров К. Н., Золотухин А. Б. Обзор методов кластеризации и ранжирования технологической доступности арктических морей на примере Баренцева моря // Нефтяное хоз-во. — 2017. — № 7. — С. 64—67. — DOI: 10.24887/0028-2448-2017-7-64-67.
2. Круглов В. В., Дли М. И., Голунов Р. Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети: Учебное пособие. — М.: Физматлит, 2001. — 224 с.
3. Исследования айсбергов / Лаборатория «Арктик-шельф». — 2006. — 20 сент. — URL: <http://www.arctic-shelf.ru/modules.php?name=Pages&pa=showpage&pid=8>.
4. Mørk K. The Challenges Facing Arctic Pipelines, Design Principles for Extreme Conditions // Offshore Oil and Gas Magazine. — 2007. — Vol. 67, iss. 9.
5. Abdalla B., Jukes P., Eltaher A., Duron B. The Technical Challenges of Designing Oil and Gas Pipelines in the Arctic. — Houston, Texas: J P Kenny Inc., 2008.
6. Подиновский В. В. Введение в теорию важности критериев в многокритериальных задачах принятия решений. — М.: Физматлит, 2007. — 67 с.
7. Ахметов О. А., Мжельский М. Б. Метод анализа иерархий как составная часть методологии проведения оценки недвижимости // Актуальные вопросы оценочной деятельности. — Новосибирск: ООО «Сиб. центр оценки», 2001.
8. Терзнев Ф. С., Гонтарев Н. П., Калацкий В. И. и др. Проект «Моря СССР». Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. — Т. 1: Баренцево море. — Вып. 1: Гидрометеорологические условия: Справочное издание. — Л.: Гидрометеоздат, 1990. — 281 с.
9. Золотухин А. Б., Гудместад О. Т., Ерманов А. И. и др. Основы разработки шельфовых нефтегазовых месторождений и строительство морских сооружений в Арктике: Учеб. пособие. — М.: Нефть и газ, 2000. — 770 с.
10. Bychkova O., Khrulenko A., Domanyuk F., Mokshaev T. Challenges and solutions for the development of arctic petroleum resources: Report on contract No. 4501579999 between StatoilHydro Petroleum AS and Gubkin Russian State University of Oil and Gas. — Moscow, 2009. — 109 p.
11. Дымов В. И., Зубакин Г. К., Клеванцов Ю. П. и др. Ветер и волны в Печорском море // Проблемы

<sup>8</sup> Заметим, что техническая доступность — далеко не единственный, однако один из основных критериев, который учитывается при оценке перспективности освоения арктических акваторий российского шельфа.

<sup>9</sup> Более подробно с подходами к классификации акваторий можно познакомиться в [1] и др.

- Арктики и Антарктики. — 2012. — № 4 (94). — С. 23—40.
12. Болтунов А. Н., Дубинин М. Ю., Ежов А. Е. и др. Районы ограничения антропогенной деятельности: Печорское море. Нефтегазовый комплекс. — Мурманск: Всемир. фонд дикой природы (WWF), 2014. — 76 с.
13. Мацневич Д. Г. Технологии разведки и разработки месторождений на арктическом шельфе // SPE Projects, Facilities & Construction. — [S. I.], 2007. — P. 1—6. — (SPE 102441).
14. Бузин И. В., Глазовский А. Ф., Гудошников Ю. П. и др. Айсберги и ледники Баренцева моря: исследования последних лет // Проблемы Арктики и Антарктики. — 2008. — № 1 (78). — С. 66—80.
15. Соловьев В. А., Гинсбург Г. Д. Арктические моря России: Условия газогидратоносности и потенциально газогидратоносные акватории. Атлас «Геология и полезные ископаемые шельфов России». — М.: ГИН РАН, 2004. — 108 с.
16. Беликов С. Е., Гаврило М. В., Горин С. Л. и др. Атлас биологического разнообразия морей и побережий российской Арктики. — М.: Всемир. фонд дикой природы (WWF России), 2011. — 64 с.
17. Крыленко М. В., Крыленко В. В. Моря арктического бассейна // Научное обеспечение сбалансированного планирования хозяйственной деятельности на уникальных морских береговых ландшафтах и предложения по его использованию на примере Азово-Черноморского побережья / Под ред. Р. Д. Косьяна. — М., 2013. — С. 590—761.
18. Матишов Д. Г., Ильин Г. В., Моисеев Д. В. Электронный атлас химического и радиоактивного загрязнения Баренцева моря / Мурман. мор. биол. ин-т КНЦ РАН. — Мурманск, 2002. — URL: <http://pollution.mmbi.info/index.html>.
19. Larsen T., Nagoda D., Andersen J. R. A biodiversity assessment of the Barents Sea Ecoregion. — Oslo: WWF's Barents Sea Ecoregion Programme, 2003. — 160 p.
20. Zolotukhin A. B. Engineering methods in petroleum sciences: Course of lectures: Preprint of Univ. of Stavanger. — Stavanger, Norway, 2007. — 207 p.

---

### Информация об авторах

**Пивоваров Константин Николаевич**, аспирант, Российский государственный университет нефти и газа (научно-исследовательский университет) имени И. М. Губкина (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., 65), e-mail: [pivovarov\\_k@mail.ru](mailto:pivovarov_k@mail.ru).

**Золотухин Анатолий Борисович**, доктор технических наук, профессор, советник ректората, Российский государственный университет нефти и газа (научно-исследовательский университет) имени И. М. Губкина, научный руководитель, Институт арктических нефтегазовых технологий (119991, Россия, Москва, Ленинский просп., 65), e-mail: [anatoly.zolotukhin@gmail.com](mailto:anatoly.zolotukhin@gmail.com).

### Библиографическое описание данной статьи

Пивоваров К. Н., Золотухин А. Б. Использование многокритериального подхода и методов нечеткой математики для оценки условий освоения месторождений арктических морей на примере юго-восточной части Баренцева моря // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 3 (31). — С. 100—111. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-100-111.

## USE OF MULTICRITERIA APPROACH AND METHODS OF FUZZY MATHEMATICS FOR ESTIMATING DEVELOPMENT CONDITIONS OF ARCTIC SEAS IN TERMS OF THE SOUTHEASTERN PART OF THE BARENTS SEA

Pivovarov K. N.

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (Moscow, Russian Federation)

Zolotukhin A. B.

Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University),  
Arctic Petroleum Technology Institute (Moscow, Russian Federation)

### Abstract

Development of the Arctic regions is one of the most important strategic tasks for Russia. Among the Arctic vast natural resources hydrocarbons are one of the most significant for the development of the northern territories and their main transport route — the Northern Sea Route (NSR), but complex environmental conditions significantly limit the possibilities for their active development.

South-Eastern part of the Barents Sea (including the Pechora Sea) is marked by sufficiently high geological exploration and acceptable weather conditions making it the best place to begin a full-scale development in the Arctic region. This is the reason to apply a new technique of classification, ranking and forecasting to technical accessibility assessment of the region.

The area of interest was divided into several subareas, each of which being analyzed in terms of its technical accessibility on each of preselected criteria (weather conditions, presence of ice, sea depth, flora & fauna, etc.). Then fuzzy clustering and aggregation techniques were used to map accessibility conditions of the South-Eastern part of the Barents Sea.

The fuzzy methodology enabled division of the area into different classes representing its technical accessibility (from most favorable to most challenging conditions). Further application of fuzzy ranking assisted in showing the best sequence of the selected subareas development.

This approach enabled the authors to build a very illustrative and informative technical accessibility map of the South-Eastern part of the Barents Sea and to propose a staged development of the region starting from the western part, then central, south and eastern parts. This mapping technique of accessibility assessment gives an opportunity to use a system approach to the development of offshore resources in middle- and long-term outlooks and enables evaluation of the existing development technology efficiency.

The approach allows estimating regional development from a different prospective and helps to better understand the challenging complexity of the Arctic areas.

**Keywords:** Arctic, the Pechora Sea, technical accessibility, fuzzy logic, fuzzy mathematics, classification, clustering, development conditions, multicriteria approach, ranking, map, forecasting.

### References

1. Pivovarov K. N., Zolotukhin A. B. Obzor metodov klasterizatsii i ranzhirovaniya tekhnologicheskoi dostupnosti arkticheskikh morei na primere Barentseva morya. [Review of clusterization and ranking methods for technological accessibility assessment of the Arctic seas illustrated by the Barents Sea case study]. Neftyanoe khoz-vo, 2017, no. 7, pp. 64—67. DOI: 10.24887/0028-2448-2017-7-64-67. (In Russian).
2. Kruglov V. V., Dli M. I., Golunov R. Yu. Nechetkaya logika i iskusstvennyye neironnyye seti: Uchebnoe posobie. [Fuzzy logic and artificial neural networks: Study guide]. Moscow, Fizmatlit, 2001, 224 p. (In Russian).
3. Issledovaniya aisbergov. Laboratoriya "Arktik-shelf". [Icebergs research. Arctic-shelf laboratory], 2006, sept. 20. Available at: <http://www.arctic-shelf.ru/modules.php?name=Pages&pa=showpage&pid=8>. (In Russian).
4. Mørk K. The Challenges Facing Arctic Pipelines, Design Principles for Extreme Conditions. Offshore Oil and Gas Magazine, 2007, vol 67, iss. 9.
5. Abdalla B., Jukes P., Eltaher A., Duron B. The Technical Challenges of Designing Oil and Gas Pipelines in the Arctic. Houston, Texas: J P Kenny Inc., 2008.
6. Podinovskii V. V. Vvedenie v teoriyu vazhnosti kriteriev v mnogokriterial'nykh zadachakh prinyatiya reshenii. [Introduction to the theory of criteria's importance in multicriteria decision-making problems]. Moscow, Fizmatlit, 2007, 67 c. (In Russian).
7. Akhmetov O. A., Mzhel'skii M. B. Metod analiza ierarkhii kak sostavnaya chast' metodologii provedeniya otsenki nedvizhimosti. [The method of analyzing hierarchies as an integral part of the methodology for real estate valuation]. Aktual'nye voprosy otsenochnoi

- deyatelnosti. Novosibirsk, OOO "Sib. tsentr otsenki", 2001. (In Russian).
8. Terznev F. S., Goptarev N. P., Kalatskii V. I. et al. Proekt "Morya SSSR" Gidrometeorologiya i gidrokhimiya morei SSSR. Vol. 1. Barentsevo more. Iss. 1. Gidrometeorologicheskie usloviya: Spravochnoe izdanie. [Project "Seas of USSR" Hydro-meteorology and hydro-chemistry of USSR's seas. Vol. 1. Barents Sea. Pt. 1. Hydrometeorological conditions: Reference editions]. Leningrad, Gidrometeoizdat, 1990, 281 p. (In Russian).
9. Zolotukhin A. B., Gudmestad O. T., Ermakov A. I., Yakobsen R. A., Mishchenko I. T., Vovk V. S., Loset S., Shkhinek K. N. Osnovy razrabotki shel'fovykh neftegazovykh mestorozhdenii i stroitel'stvo morskikh sooruzhenii v Arktike: Ucheb. posobie. [Basics of the offshore oil and gas field development and construction of marine facilities in the Arctic: Study guide]. Moscow, Neft' i gaz, 2000, 770 p. (In Russian).
10. Bychkova O., Khrulenko A., Domanyuk F., Mokshaev T. Challenges and solutions for the development of arctic petroleum resources: Report on contract No. 4501579999 between StatoilHydro Petroleum AS and Gubkin Russian State University of Oil and Gas. Moscow, 2009. 109 p.
11. Dymov V. I., Zubakin G. K., Klevantsov Yu. P., Rozhkov V. A., Skutina E. A. Veter i volny v Pechorskoy more. [Winds and waves in Pechora Sea]. Problemy Arktiki i Antarktiki, 2012, no. 4 (94), pp. 23—40. (In Russian).
12. Boltunov A. N., Dubinin M. Yu., Ezhov A. E., Larionov M. V., Novoselov A. P., Pukhova M. A., Frolova E. A. Raiony ogranicheniya antropogennoi deyatelnosti: Pechorskoy more. Neftegazovyi kompleks. [Anthropogenic activities restriction areas: Pechora Sea. Oil Gas complex]. Murmansk, Vsemir. fond dikoi prirody (WWF), 2014, 76 p. (In Russian).
13. Matskevich D. G. Tekhnologii razvedki i razrabotki mestorozhdenii na arkticheskom shel'fe. [Technologies for field exploration and development On Arctic shelf]. SPE Projects, Facilities & Construction. [S. I.], 2007, pp. 1—6. (SPE 102441). (In Russian).
14. Buzin I. V., Glazovskii A. F., Gudoshnikov Yu. P. et al. Aisbergi i ledniki Barentseva morya: issledovaniya poslednikh let. [Icebergs and glaciers in Barents Sea: research in recent years]. Problemy Arktiki i Antarktiki, 2008, no. 1 (78), pp. 66—80. (In Russian).
15. Solov'ev V. A., Ginsburg G. D. Arkticheskie morya Rossii: Usloviya gazogidratonosnosti i potentsial'no gazogidratonosnye akvatorii. Atlas "Geologiya i poleznye iskopaemye shel'fov Rossii". [Russian Arctic seas. Gas hydrate conditions and potentially gas hydrate-bearing areas. Atlas "Geology and minerals of the Russian shelf"]. Moscow, GIN RAN, 2004, 108 p. (In Russian).
16. Belikov S. E., Gavrilov M. V., Gorin S. L. et al. Atlas biologicheskogo raznoobraziya morei i poberezhii rossiiskoi Arktiki. [Atlas of the biological diversity of the seas and coasts of the Russian Arctic]. Moscow, Vsemir. fond dikoi prirody (WWF Rossii), 2011, 64 p. (In Russian).
17. Krylenko M. V., Krylenko V. V. Morya arkticheskogo basseina // Nauchnoe obespechenie sbalansirovannogo planirovaniya khozaistvennoi deyatelnosti na unikal'nykh morskikh beregovykh landshaftakh i predlozheniya po ego ispol'zovaniyu na primere Azovo-Chernomorskogo poberezh'ya. [Arctic seas. Scientific provision for balanced planning of economic activities on unique coastal landscapes and proposals for its use on the example of the Azov-Black Sea coast]. Pod red. R. D. Kos'yana. Moscow, 2013, pp. 590—761. (In Russian).
18. Matishov D. G., Il'in G. V., Moiseev D. V. Elektronnyi atlas khimicheskogo i radioaktivnogo zagryazneniya Barentseva morya. [Digital atlas of chemical and radioactive pollutions in Barents Sea]. Murman. mor. biol. in-t KNTs RAN. Murmansk, 2002. Available at: <http://pollution.mmbi.info/index.html>. (In Russian).
19. Larsen T., Nagoda D., Andersen J. R. A biodiversity assessment of the Barents Sea Ecoregion. Oslo, WWF's Barents Sea Ecoregion Programme, 2003, 160 p.
20. Zolotukhin A. B. Engineering methods in petroleum sciences: Course of lectures: Preprint of Univ. of Stavanger. Stavanger, Norway, 2007, 207 p.

### Information about the authors

**Pivovarov Konstantin Nikolayevich**, Postgraduate student, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University) (65, Leninsky Pros., Moscow, Russia, 19991), e-mail: pivovarov\_k@mail.ru.

**Zolotukhin Anatoly Borisovich**, Doctor of Technical Science, Professor, Rectorat's councillor, Gubkin Russian State University of Oil and Gas (National Research University), Research Director of Arctic Petroleum Technology Institute (65, Leninsky Pros., Moscow, Russia, 19991), e-mail: anatoly.zolotukhin@gmail.com.

### Bibliographic description

Pivovarov K. N., Zolotukhin A. B. Use of multicriteria approach and methods of fuzzy mathematics for estimating development conditions of arctic seas in terms of the southeastern part of the Barents Sea. Arctic: ecology and economy, 2018, no. 3 (31), pp. 100—111. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-3-100-111. (In Russian).