

СЕЙСМИЧЕСКИЕ СТРУКТУРЫ, ПОЛУЧЕННЫЕ НА ГЛУБИНАХ РИСКА БУРЕНИЯ ПО ДАННЫМ МОНИТОРИНГА АРКТИЧЕСКОЙ АКВАТОРИИ ПОТЕНЦИАЛЬНОГО РАЗМЕЩЕНИЯ ЗАЛЕЖЕЙ УГЛЕВОДОРОДОВ¹

Смагличенко Т.А., Саянкина М.К.,

Институт проблем нефти и газа РАН, Москва, Россия
tasmaglichr@gmail.com, msayankina@gmail.com

Смагличенко А.В.

*Институт сейсмологии и геодинамики, КФУ им. В.И. Вернадского,
Симферополь, Республика Крым*
losaeylin@gmail.com

Аннотация. Сейсмическая модель построена для залива Скьяльфанди (север Исландии), где возникают выбросы метана. Скоростные аномалии, выявленные на глубинах риска бурения с применением метода выбранного координатного спуска, могут использоваться для принятия управленческих решений о разработке месторождений в провинциях высокоширотной Арктики.

Ключевые слова: вычислительные методы, скопление углеводородов, метан, скорость сейсмической волны.

Введение

Бурение поисково-разведочных скважин – основная составляющая геологических работ для обнаружения запасов нефти и газа. Например, в акватории Азовского моря эксплуатируются несколько газоконденсатных месторождений, которые были определены путем бурения скважин, отбора в них керна, проведения каротажных работ [1]. Вскрытые скважины позволили не только оценить присутствие месторождений, но и по глубинным породам уточнить детали геологических структур региона. Глубина пробуренных скважин в районах добычи часто достигает 3.1 км [2].

Глубина бурения в регионах, в которых существуют источники тепловой энергии, варьируется от 2 до 3 км. Увеличение глубины бурения способно создать экологические риски. Так, на северо-востоке Исландии бурение до глубины 4.5 км привело к ситуации, когда флюиды с очень высокой температурой попали в скважину и обрушили ее [3]. Это привело к необходимости цементирования скважины в течение трех месяцев, к заполнению специальным раствором образовавшихся пустот. Химические реагенты, в том числе, реагенты цементного камня имеют токсичные примеси и могут загрязнять окружающую среду [4].

В данной работе исследуются сейсмические структуры в диапазоне глубин 5-10 км. Вариации сейсмической скорости были определены для района залива Скьяльфанди (север Исландии), на побережье которого расположен туристический город Хусавик, где в 2018 г. был введен в эксплуатацию крупный завод по производству металлического кремния. Изучение сейсмических параметров на глубинах свыше 5 км имеет практическое значение. Так, в 2001 г. в заливе Скьяльфанди на дне океана на глубинах осадочного слоя (толщина 0.5-4 км) были отмечены выбросы метана. Акустическое просвечивание показало, что выход газа идет из нескольких неглубоких дыр вытянутых впадин диаметром до 30 метров [5]. В [6] анализ кернов, извлеченных из океанических осадков с глубиной приповерхностного слоя 5 метров, показал, что газ имеет биогенное происхождение. Авторы [6] предполагают, что такое активное просачивание метана может быть связано с образованием нефти и газа в глубоких слоях.

Выводы [6] подтверждаются в работе [7] фактами обнаружения полициклических ароматических углеводородов в пробах обломочных отложений, взятых из пробуренных скважин. Природные полициклические ароматические углеводороды могут образовываться либо в осадочной толще, либо глубже под влиянием процесса переработки газов, в том числе и метана [7]. Практика добычи полезных ископаемых в других районах мира [8] свидетельствует, что полициклические ароматические углеводороды часто являются индикаторами нефтеносных районов. Поэтому их обнаружение в заливе при совместном факте выбросов метана позволяет предположить присутствие залежи. Заметим, что анализ изменения локальных мест нахождения полициклических ароматических углеводородов в поверхностных отложениях может выявить миграцию углеводородов в глубоких слоях [7].

В настоящей работе мы представляем результат вычисления значений сейсмической скорости в районе залива Скьяльфанди, полученный на основе решения систем линейных уравнений методом

¹ Работа выполнена в рамках государственного задания № 122022800270-0

выбранного координатного спуска (ВКС) [9], используя в качестве известных членов системы информацию о зарегистрированных локальных землетрясениях. Мониторинг проводился временными сейсмическими станциями, расположенными вдоль береговой линии залива. Скоростная структура впервые демонстрируется для исследуемого залива Гренландского моря на севере Исландии в диапазоне глубин 5-10 км, имеющего приемлемые показатели параметра разрешения метода.

Сопутствующий аспект необходимости изучения характеристик данного слоя – существование сейсмического риска. Исторические записи говорят о том, что два значимых землетрясения произошли в заливе Скъяльфанди. В 1755 г. сильные волны, подобные цунами, перевернули пару лодок, погибли люди, а прибрежное поселение Хусавик было полностью разрушено. Событие связали с активностью разлома, так как разлом Хусавик, расположенный в море, вклинивается в часть города с одной стороны и проходит под ним в другую часть залива, тоже примыкающую к городу. Мощные толчки следующего мощного землетрясения 1872 г. также объясняют активизацией разлома. Исторические материалы указывают, что на мысе открылись трещины, и четыре дня струилось что-то вроде голубого газа, от места исходил сильный жар, были вспышки. Океан отступил, а затем вернулся с сильными волнами, обрушившимися на береговую линию. И город во второй раз остался в руинах. В связи с этими фактами отметим другое известное землетрясение, которое произошло в 1927 г. в южной части полуострова Крым. Оно также сопровождалось присутствием цунами на некоторых побережьях. А во время основного толчка наблюдались вспышки огня. Научные доводы подтверждают, что огненные столбы были выходом метана из мест глубоких подвижек, которые проявились трещинами на дне моря [10]. Опыт Крымского землетрясения и недавние инструментальные наблюдения в заливе Скъяльфанди позволяют предположить, что с большой вероятностью вспышки газа в 1872 г. на мысе Хусавик были метаном. Современные методы, уточняющие координаты гипоцентров землетрясений, которые происходят вдоль разлома Хусавик, указывают на то, что сейсмические события в основном распределены в диапазоне глубин 4-8 км [11], где следует ожидать локацию основных разломных трещин. Следовательно, изучаемый в нашей работе слой на глубинах 5-10 км важен для понимания связи между геодинамическим состоянием среды и возможным присутствием углеводородов.

Применяемая вычислительная технология является новым вариантом традиционно используемого в различных областях промышленности метода координатного спуска. В отличие от обычного спуска, который определяет координату, циклически проверяя вероятностные критерии на близость решения к минимуму функционала в смысле наименьших квадратов, ВКС использует аналитическое выражение для параметра, максимальное значение которого ответственно за минимум данного функционала [12]. Итерационный спуск по максимальным значениям оценок неизвестных членов системы формирует отличительную черту ВКС, которая – в способности идентифицировать контрастные неоднородности геологической среды. Для того чтобы сделать использование ВКС понятным для специалистов, работающих в нефтегазовой отрасли, в настоящей работе мы приводим расчетные формулы для основных шагов ВКС в терминах геофизических параметров, в отличие от предыдущей работы [12], где дано описание ВКС как алгебраического метода.

1. Математическая модель вариаций скорости сейсмической волны в блоках геосреды как система линейных уравнений

Построим модель геосреды, выбрав её объем так, чтобы на поверхности интересующей нас территории была установлена сеть приемников сейсмических сигналов, а внутри объема были расположены гипоцентры локальных землетрясений малой магнитуды, произошедшие в течение определенного периода времени. Объем разбивается на прямоугольные блоки, размер которых определяется параметрами зарегистрированных сейсмических волн. Каждый сейсмический луч имеет свое время пробега τ от точки гипоцентра до приемника. Совокупность сейсмических лучей пронизывает изучаемый объем. Так как гипоцентры распределены в пространстве неравномерно, часто кластерами, то не все блоки заполнены лучами.

Для многих районов известны усредненные модели скорости сейсмической волны, как на локальном, так и на региональном уровне. Они выявлены по данным глубинного сейсмического зондирования (ГСЗ), когда вместо природных источников сейсмических событий использовались взрывчатые вещества, имитирующие эти события. Таким образом, функция усреднённой скорости $v_0(z)$, где z – глубина, может быть задана. Для такой функции можно вычислить время пробега каждого луча $\tilde{\tau}$, решая прямую задачу. Делая предположение [13] о том, что функция реальной скорости $v(x, y, z)$ является суммой функции $v_0(z)$ и функции малых вариаций скорости $\delta v(w, z)$ относительно усреднённой скорости $v_0(z)$, следуя теории линеаризации [13], можно записать:

$$\tau = \tilde{\tau} + \int_L \frac{[-\delta v(w,z)]}{v_0^2(z)} ds. \quad (1)$$

Интегрирование ведется вдоль пути луча L в невозмущенной среде. Предполагается, что вариации скорости $\delta v(w, z)$ достаточно гладкие и могут изменить путь луча лишь на небольшую величину. Невязка времени пробега это разница между наблюдаемым временем пробега τ и временем $\tilde{\tau}$, теоретическим, вычисленным для модели усреднённой скорости района. Обозначим ее как $\bar{\tau}$. Для каждого луча, прошедшего через K блоков интеграл в уравнении (1) может быть представлен как сумма интегралов вдоль путей луча l в отдельно взятых блоках:

$$\bar{\tau} = \sum_{k=1}^K \int_{l_k} \frac{[-\delta v(w,z)]}{v_0^2(z)} ds_0 \quad (2)$$

Введем обозначения: $\bar{v}_k = \delta v(w, z)$ и $g_k = -\frac{\int_{l_k} ds_0}{v_0^2(z)} = -\frac{l_k}{v_0^2(z)}$.

Тогда для отдельно взятого сейсмического луча n уравнение (2) запишется как:

$$\bar{\tau}_n = \sum_{k=1}^K \bar{v}_k g_k. \quad (3)$$

Для N лучей, зарегистрированных в объеме геосреды, получаем систему линейных уравнений:

$$\bar{\tau} = G \bar{v}, \quad (4)$$

где G – известная матрица размерностью $N \times K$, элемент которой g_{nk} равен длине пути n -го сейсмического луча в k -ом блоке среды, делённой на квадрат величины известной усреднённой сейсмической скорости в исследуемом районе. Зная функцию усреднённой скорости $v_0(z)$, можно вычислить длину пути каждого n -го луча. $\bar{\tau}$ – известный вектор, элемент которого $\bar{\tau}_n$ невязка времени пробега n -го луча, \bar{v} – неизвестный вектор, элемент которого \bar{v}_k вариация сейсмической скорости в k -ом блоке относительно усреднённой скорости в районе.

2. Метод выбранного координатного спуска как технология сейсморазведки

Метод выбранного координатного спуска в деталях описан в [12]. Отличительная черта метода от классического координатного спуска – в аналитическом решении, которое позволило определить направление минимума функционала в смысле метода наименьших квадратов через разработанные формулы, в то время как традиционный координатный спуск ищет направление спуска циклически, применяя вероятностные критерии [14]. Преимущество выбранного координатного спуска – в разработанном параметре разрешения, численное значение которого является оценкой достоверности того, насколько значение найденной компоненты неизвестного вектора линейной системы близко к точному значению [15].

Согласно подходу наименьших квадратов, традиционно используемому для численных методов, ставится задача минимизации функционала:

$$F(\bar{v}) = \|G\bar{v} - \bar{\tau}\|^2. \quad (5)$$

Итерационные приближения будем искать в виде:

$$\bar{v}^i = \bar{v}^{i-1} + \vartheta_k e_k, \quad (6)$$

где e_k – единичный вектор, ϑ_k задаёт направление спуска через номер блока геосреды k , величина ϑ_k определяется из условия равенства производной нулю: $F'(\vartheta_k) = 0$:

$$\vartheta_k = (-\sum_{n=1}^{N_k} l_k^n \bar{\tau}_n / \sum_{n=1}^{N_k} (l_k^n)^2) \vartheta_0^2(z), \quad (7)$$

где N_k – число лучей, которые пересекли k -ый блок геосреды, l_k^n – длина пути n -того луча в k -том блоке, $\bar{\tau}_n$ – невязка времени пробега n того луча, $\vartheta_0(z)$ – величина усредненной скорости на глубине, в пределах которой расположен k -ый блок.

Подставим выражение (7) для расчета ϑ_k в формулу (6). Полученную формулу детального расчета \bar{v}^i подставим в выражение (5) вместо \bar{v} для расчета значения функционала. После преобразований получаем, что значение функционала на i шаге итерации зависит от выбора направления спуска k (выбора номера блока) на предыдущем $i - 1$ шаге следующим образом:

$$F^{(i)}(\bar{\vartheta}, k) = F^{(i-1)}(\bar{\vartheta}, k) - \hat{\vartheta}(k), \quad (8)$$

где $\hat{\vartheta}(k) = \frac{(\sum_{n=1}^{N_k} l_k^n \bar{\tau}_n)^2}{\sum_{n=1}^{N_k} l_k^{n^2}}$. Из уравнения (8) следует, что выбор k , для которого значение величины $\hat{\vartheta}(k)$ максимально по модулю, обеспечит минимальное значение функционала.

3. Результат применения вычислительной технологии

Данные регистрации времен вступлений продольных сейсмических волн от локальных землетрясений, которые произошли в течение 1987-1989 гг. в заливе Скъяльфанди, сформировали известный вектор линейной системы (4). Рисунок 1 показывает карту рельефа изучаемого района. Оттенки зеленого и коричневого цветов соответствуют разным уровням низменности и возвышенности.

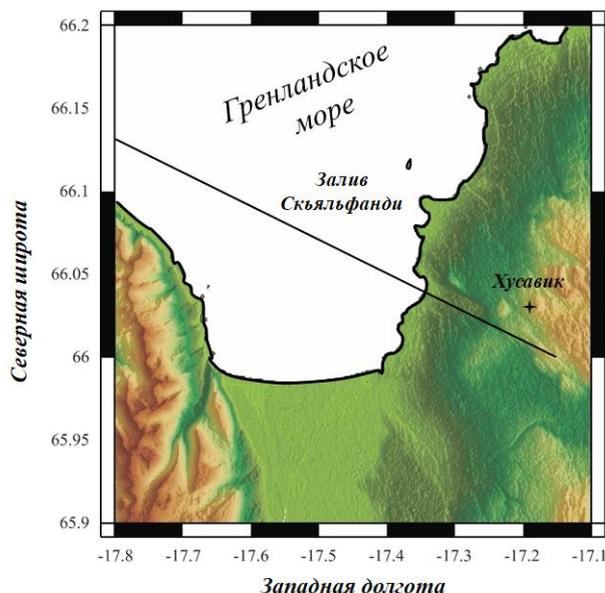


Рис. 1. Карта рельефа залива Скъяльфанди. Разлом Хусавик обозначен прямой линией черного цвета. Город Хусавик показан условным знаком. Кривая линия оконтуривает берег

Рисунок 2 иллюстрирует сейсмические скорости, вычисленные по аномалиям, полученным в результате решения системы для глубин риска бурения. Вариации скорости в районе представлены на фоне усредненного поля исходной модели. Распределение низкоскоростных (оттенки красного цвета) и высокоскоростных (оттенки синего цвета) аномалий позволяет выявить следующее. На глубинах 5-10 км залив Скъяльфанди характеризуется занижением сейсмической скорости до $Vp=6.7$ км/с. Это согласуется с результатом вычисления скорости для района газового поля Гримси $Vp=6.4$ км/с [16], расположенного в северо-западном направлении от залива Скъяльфанди. Значение скорости в поле Гримси так же занижено относительно усредненной скорости в районе. Так же, как и в случае залива Скъяльфанди, замеры газов на морском дне Гримси, показали, что основной составляющей смеси газов является метан.

Отметим, что обнаруженная в заливе Скъяльфанди низкоскоростная аномалия «врезается» в прибрежную часть и распределяется по низменности, в то время как высокоскоростная вариация соответствует возвышенности, на которой расположен город Хусавик. Таким образом, вычисленные структуры не противоречат особенностям рельефа в прибрежной зоне залива.

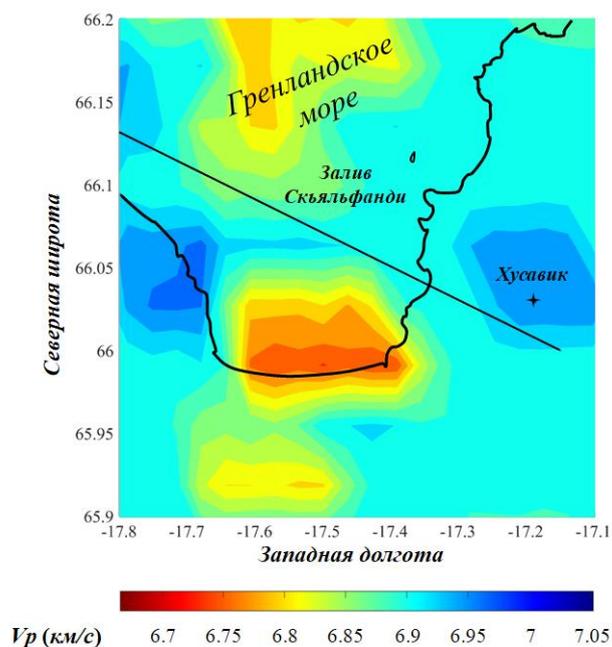


Рис. 2. Низкоскоростные и высокоскоростные аномалии, вычисленные методом выбранного координатного спуска

Отсутствие явно выраженных контрастных скоростных неоднородностей в заливе Скъяльфанди предполагает, что здесь не должно быть сильной сейсмичности. Этот результат подтверждается фактами мониторинга за 1995-2020 гг. [17]. На участке разлома Хусавик в заливе события малой магнитуды регистрировались, но их предельно мало.

4. Заключение

Выявленные пониженные скорости сейсмической волны в глубоком слое, следующим за осадочными отложениями, могут свидетельствовать о флюидонасыщенности геосреды. Это согласуется с предложением авторов [7] о подъеме углеводородов из коры вместе с флюидами высокой температуры к поверхности.

Либо, учитывая данные современных измерений [5,6], о которых было сказано выше, можно предположить, что занижение скорости связано с повышенной концентрацией газа в локальных местах. Биогенное происхождение метана предполагает его размещение в осадочном слое, однако при повышении температуры не исключается его присутствие на большей глубине. В связи с плохим разрешением поверхностного слоя от 0 до 5 км, мы не можем там демонстрировать сейсмические скорости. В то же время, результаты высокого разрешения, полученные для диапазона глубин 5-10 км, могут быть использованы. Присутствие нескольких площадей выхода метана из морского дна не исключает локальные органические отложения глубже осадочной толщи. Более того, горение газа в период сильного землетрясения 1872 г. могло быть спровоцировано подвижками вдоль разлома на большой глубине. И даже если за прошедшие 25 лет в заливе не зарегистрированы ощутимые землетрясения [17], тем не менее, можно предположить нахождение природных газов на глубинах 5-10 км в условиях слабой деформации современной геосреды.

Найденные особенности скоростного строения района потенциального скопления углеводородов могут быть использованы для месторождений Сибири. Мы провели детальный анализ тектонической карты Арктики [18] и определили, что существует явная схожесть распределения конфигураций разломов и линейментов для провинций высокоширотной Арктики, которые берут начало от широты исследуемого региона Исландии и продолжают до провинций Сибири. Например, широта исследуемого района совпадает с широтой Заполярного нефтегазоконденсатного месторождения в Салехарде (Западная Сибирь). В то же время известно, что запасы Западной Сибири истощены, а Восточная Сибирь нуждается в изучении. Заметим, что найденный идентификатор района углеводородных запасов в виде пониженной скорости продольной сейсмической волны для диапазона глубин 5-10 км относится не к истощенным, а к потенциально существующим новым месторождениям.

Учитывая возможные экологические риски (провокация землетрясения, обрушения скважин при глубоком бурении) управление топливно-энергетическими ресурсами невозможно без проектов по

предварительному определению характеристик территориальных объектов. Проекты должны включать сбор данных сейсмического мониторинга, применение высокоточных методов обработки данных для достижения робастных оценок.

Литература

1. Еремин Н.А., Шумский Б.В., Шабалин Н.А., Еремин А.Н. Новые результаты геологических исследований транзитных зон северо-восточной части Азовского моря // Геология нефти и газа. – 2017. Вып. 1. – С. 43–51.
2. Еремин Н. А., Сарданашивили О.Н., Пономарева И.А. Скифская плита в режиме on-line. Инновационные технологии освоения нефтяных месторождений в реальном времени // журнал «Neftegaz.RU». – 2015. – N 11-12. – Id 671376.
3. Dobson P.F., Asanuma H., Huenges E., Poletto F., Reinsch T., Sanjuan B. Supercritical Geothermal Systems – A Review of Past Studies and Ongoing Research Activities // In Proceedings of the 42nd Workshop on Geothermal Reservoir Engineering. – Stanford, 2017. – P. 670–682.
4. Поварова Л.В. Экологические риски, связанные с эксплуатацией нефтяных месторождений // Отраслевые и прикладные исследования: Науки о земле. – 2018. – С. 112–122.
5. Richter B., Driscoll N., Detrick R.S., Fornari D., Brandsdottir B. Recently Discovered Near-Shore Gascharged Sediments and Pockmarks, Northern Iceland // American Geophysical Union, Fall Meeting. – 2003. – Id OS51B-0854.
6. Richter B., Brandsdottir B., Geptner A., Driscoll N., Boejesen-Koefoed J. Hydrocarbon prospect of the Tjornes Fracture Zone, north of Iceland // American Geophysical Union, Fall Meeting. – 2005. – Id OS33C-1487.
7. Geptner A.R., Richter B., Pikovskii Y., Chernyansky S.S., Alexeeva T.A. Polycyclic aromatic hydrocarbons as evidence of hydrocarbon migration in marine and lagoon sediments of a recent rift zone (Skjálfandi and Öxarfjörður), Iceland // Geochemistry. – 2006. – Vol. 66(3). – P. 213–225.
8. Plummer B.F. Structure and Photochemistry of Cyclopentene-Fused Polycyclic Aromatic Hydrocarbons // Polycyclic Aromatic Compounds. – 1993 – Vol. 3(2). – P. 77–88.
9. Смагличенко Т.А., Якоби В., Смагличенко А.В., Ахметзянов А.В. Инновационные численные методы на примере 3D сейсмического просвечивания природной зоны с газовыми скоплениями // Управление развитием крупномасштабных систем (MLSD'2020): труды тринадцатой междунар. конф. – М.: ИПУ РАН, 2020. – С. 764–772.
10. Никонов А.А. Крымские землетрясения 1927 года: неизвестные явления на море // Природа. – 2002.– N 9. – С. 13–20.
11. Rognvaldsson S., Gudmundsson A., Slunga R. Seismotectonic Analysis of the Tjornes Fracture Zone, an Active Transform Fault in North Iceland // J. Geophys. Res. – 1998. – Vol. 103. – P. 30117–30129.
12. Smaglichenko T., Smaglichenko A. Identification of Inhomogeneities: The Selected Coordinate Descent Method Applied in the Drilling Area // Mathematics. – 2023. – Vol. 11. Id 4297. – DOI: 10.3390/math11204297.
13. Лаврентьев М.М., Романов В.Г. О трех линеаризированных обратных задачах для гиперболических уравнений // Докл. АН СССР. – 1966. – Вып. 171:6. С. 1279–1281.
14. Wright S.J. Coordinate descent algorithms // Math. Program. – 2015. – Vol. 151(1). – P. 3–34. – DOI: 10.1007/s10107-015-0892-3.
15. Smaglichenko T.A., Smaglichenko A.V. Resolution Estimates for Selected Coordinate Descent: Identification of Seismic Structure in the Area of Geothermal Plants / In: Dolgui A., Bernard A., Lemoine D., von Cieminski G., Romero D. (eds) // Advances in Production Management Systems. Artificial Intelligence for Sustainable and Resilient Production Systems. IFIP Advances in Information and Communication Technology. – Switzerland: Springer, 2021. – Vol. 630. – P. 580–588. – DOI: 10.1007/978-3-030-85874-2_62.
16. Smaglichenko T.A., Jacoby W., Smaglichenko A.V. Alternative 3D Tomography Methods and Their Applications to Identify Seismic Structure Around the Hydrothermal Gas Field // Proceedings of 2020 Eleventh International Conference "Management of large-scale system development" (MLSD) / Moscow (September 2020r.). – Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), 2020. – Id 3170.
17. Einarsson P., Brandsdóttir B. Seismicity of the Northern Volcanic Zone of Iceland // Front. Earth Sci. – 2021. – Vol. 9. – Id 628967. – DOI: 10.3389/feart.2021.6289.
18. Тектоническая карта Арктики / ред. О.В. Петров, М. Пубелье (ВСЕГЕИ/CGMW). – СПб.: ВСЕГЕИ, 2019.– 72 с.