

Сейсмичность и разработка Альметьевской площади Ромашкинского месторождения углеводородов

И.Н. Огнев*, А.И. Степанов

Казанский (Приволжский) федеральный университет, Казань, Россия

За последние несколько десятилетий стало очевидно, что разные виды человеческой деятельности могут вызвать локальный рост сейсмической активности. Одной из важных сфер, в которой проявляется связь сейсмической активности с производственной деятельностью человека является разработка месторождений углеводородов. Юго-Восток Республики Татарстан является регионом, где наблюдается связь сейсмической активности с разработкой уникального Ромашкинского месторождения углеводородов. Целью настоящего исследования является анализ причинно-следственного характера взаимосвязи сейсмической активности с разработкой Альметьевской площади Ромашкинского месторождения, которая расположена в наиболее сейсмически активной области Юго-Востока Татарстана.

Ключевые слова: сейсмичность, разработка месторождений углеводородов, индуцированная сейсмичность, Ромашкинское месторождение

Для цитирования: Огнев И.Н., Степанов А.И. (2021). Сейсмичность и разработка Альметьевской площади Ромашкинского месторождения углеводородов. *Георесурсы*, 23(4), с. 51–57. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.4.6>

Введение

Сейсмическая активность регионов с активно ведущейся разработкой месторождений углеводородов – это явление, которое стало активно изучаться в последние несколько десятков лет (Ellsworth, 2013; Grasso, 1992; Suckale, 2009). Наиболее часто речь идёт о так называемой индуцированной сейсмичности или сейсмичности, вызванной вследствие воздействия на пласт, сопровождающегося добычей и закачкой флюидов. В то же время, в некоторых работах допускается обратная зависимость, когда повышенная сейсмичность является не следствием, а причиной изменения процессов эксплуатации месторождений углеводородов (Adushkin et al., 2000; Ognev et al., 2020).

Целью настоящего исследования является изучение связи сейсмической активности с параметрами разработки Альметьевской площади уникального Ромашкинского месторождения углеводородов с определением причинно-следственных связей изменения сейсмической активности и параметров разработки Альметьевской площади.

Материалы и методы

Исследуемая площадь находится на Юго-Востоке Татарстана – регионе, который, как и вся Восточно-Европейская платформа, является достаточно малоактивным в отношении своей сейсмичности (Хисамов и др., 2012; Мирзоев и др., 2004). Тем не менее, начиная с 80-х годов XX века на территории данного региона начала функционировать и вести запись сейсмических событий локальная сеть сейсмических пунктов наблюдения, оперируемая ПАО «Татнефть». В настоящем исследовании используется выборка сейсмических событий, зарегистрированных

ПАО «Татнефть» на территории Юго-Востока Татарстана за 1996–2020 гг. (рис. 1).

Методология исследования заключается в следующей последовательности операций:

- Анализ каталога сейсмических событий с целью определения уровня надежной регистрации сейсмических событий в данном каталоге;
- Расчёт интегральной характеристики сейсмической активности региона и ее осреднение;
- Осреднение избранных параметров разработки Альметьевской площади Ромашкинского месторождения;
- Анализ взаимосвязи сейсмической активности региона и избранных параметров разработки; определение вероятной причинно-следственной связи между сейсмической активностью и изучаемыми параметрами.

Описание и анализ каталога сейсмических событий

Каталог сейсмических событий – это один из результатов сейсмического мониторинга, предоставляющий информацию о хронологическом порядке землетрясений, координатах их эпицентров, глубинах гипоцентров и энергетических классах землетрясений.

В настоящем исследовании используется каталог локальных землетрясений, зарегистрированных сейсмической сетью ПАО «Татнефть» на территории Юго-Востока Татарстана за 1996–2020 гг. В данный каталог на момент анализа входило 393 местных землетрясения с магнитудами от –2.5 до 3.9. Основные пики сейсмической активности приходились на вторую половину 1990-х и 2018 гг. (Ognev et al., 2020). Локализация гипоцентров по глубинам соответствует нормальному закону с большинством сейсмических событий, происходящих в верхней

* Ответственный автор: Игорь Николаевич Огнев
e-mail: ognev.igor94@gmail.com

© 2021 Коллектив авторов

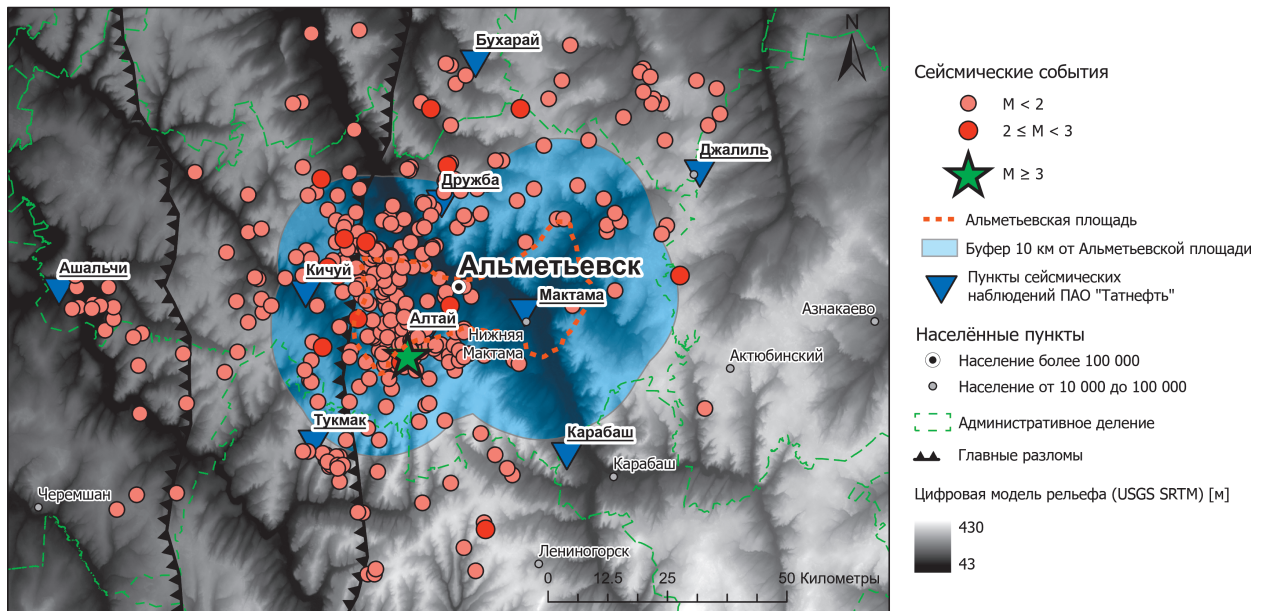


Рис. 1. Карта сейсмических событий на территории Юго-Востока Татарстана за период 1996–2020 гг.

части разреза на глубине 2–3 км. Распределение эпицентров землетрясений также нельзя назвать однородным. Основная масса землетрясений происходит в западной части Ромашкинского и центральной части Ново-Елховского месторождений и имеет субмеридиональное простирание параллельно Алтуно-Шунакскому прогибу. Как отмечено Хисамовым и др. (2012), такая тенденция наблюдается именно для землетрясений с гипоцентрами, расположенными на глубинах 0–8 км, которые могут быть вызваны как техногенными, так и тектоническими причинами. Более глубинные, исключительно тектонические землетрясения распределены по площади равномерно без видимой географической связи с границами крупных месторождений углеводородов (Хисамов и др., 2012).

Как видно, общее количество сейсмических событий на территории не велико. В то же время, не все имеющиеся сейсмические события являются представительными

и могут быть использованы в дальнейшем анализе сейсмической активности. Первым шагом при анализе сейсмичности территории является оценка качества сейсмического каталога, заключающаяся в определении уровня надёжной регистрации землетрясений M_c (Magnitude of completeness). Уровень надёжной регистрации соответствует минимальной магнитуде сейсмических событий, при которой они будут регистрироваться данной сейсмической сетью наблюдений с вероятностью 100 % (Rydelek, Sacks, 1989).

Для определения уровня надёжной регистрации исследуемого сейсмического каталога был применён метод максимальной кривизны (MAXC – maximum curvature) (Wiemer, Wyss, 2000), который заключается в расчёте максимального значения первой производной кумулятивного графика повторяемости сейсмических событий (FDM – Frequency-magnitude distribution) (рис. 2).

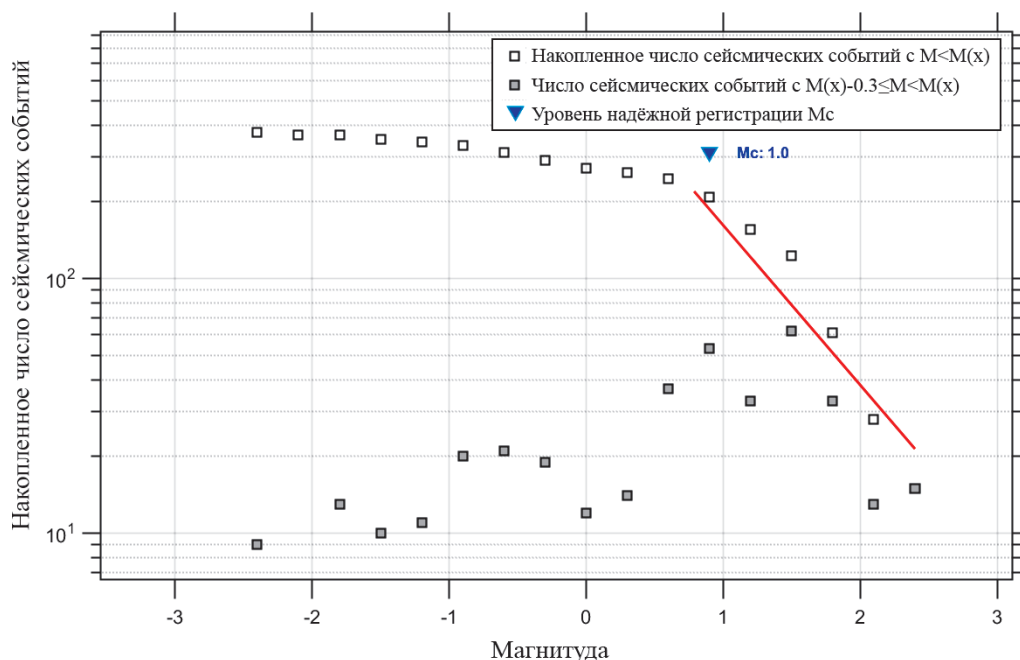


Рис. 2. Кумулятивный график повторяемости землетрясений Юго-Востока Татарстана, произошедших с 1996 по 2020 гг.

Следующим шагом после определения M_c было определение значения коэффициента наклона b по методу максимального правдоподобия (Maximum likelihood technique) (Aki, 1965; Mignan, Woessner, 2012):

$$b = \frac{\log_{10}(e)}{\langle M \rangle - \left(M_c - \frac{\Delta M}{2} \right)}, \quad (1)$$

где $\langle M \rangle$ – это средняя магнитуда землетрясений из анализируемого каталога с магнитудой $\geq M_c$; ΔM – это ширина биннинга (Binning width).

В данном исследовании использовалось программное обеспечение для анализа сейсмических событий ZMAP (Wiemer, 2001). Ширина биннинга была принята за 0.3. Для увеличения статистической точности расчёта был использован метод бутстрэп (bootstrapping) с количеством шагов передискретизации, равным 10 000.

В результате, уровень надёжной регистрации землетрясений составил $M_c = 1.0$ и коэффициент наклона $b = 0.63 \pm 0.13$. Получившееся значение коэффициента наклона оказалось существенно меньше значений 1.02–1.3, определённых ранее в (Adushkin et al., 2000), что может свидетельствовать об уменьшении доли техногенной сейсмичности на территории Юго-Востока Татарстана с 1980 до 2020 гг.

Таким образом, для дальнейшего анализа было использовано 166 сейсмических событий с $M \geq 1$ из исходных 393, зарегистрированных за период с 1996 по 2020 гг.

Расчёт интегральной характеристики сейсмической активности

После обработки сейсмического каталога и исключения из него всех сейсмических событий с магнитудой менее 1 по шкале Рихтера была рассчитана интегральная характеристика сейсмической активности региона. В качестве такой характеристики использовалась сумма кубических корней из энергии землетрясений, произошедших за 1 месяц по аналогии с исследованием авторов (Adushkin et al., 2000). Энергия землетрясения зависит от его энергетического класса по следующей формуле (Rautian et al., 2007):

$$K = \log_{10} E \text{ (в джоулях)}. \quad (2)$$

Для более сглаженного результата энергии землетрясений, произошедших за 1 месяц, были осреднены в скользящем среднем окне, величиной 12 месяцев.

Полученный результат нормировался на среднее значение сейсмической активности для всего периода измерений.

При оценке интегральной характеристики сейсмической активности учитывались только те сейсмические события, местоположение которых находилось в пределах 10-километровой зоны от контура Альметьевской площади (рис. 1) для исключения удалённой сейсмичности из анализа.

Итоговый график изменения сейсмичности рассматриваемого региона представлен на рисунке 3.

Как видно из рисунка 3, выделяются два пика с повышенной сейсмической активностью, разнесённые во времени на 12.5 лет – в 1996 и 2008 годах. Также следует учесть, что в период с 2006 по 2008 год локальная сейсмическая сеть не функционировала, в связи с чем в этот период показана нулевая сейсмичность.

Анализ взаимосвязи сейсмической активности региона и параметров разработки Альметьевской площади

Следующим этапом было определение взаимосвязи сейсмической активности с параметрами разработки Альметьевской площади. Такая взаимосвязь определялась через корреляционный анализ интегральной характеристики сейсмической активности с отдельными параметрами разработки. К анализируемым параметрам относятся действующий нагнетательный фонд скважин, действующий добывающий фонд скважин, эффективность закачки, дисбаланс, обводненность, средняя добыча нефти по скважинам, средняя добыча жидкости по скважинам, добыча нефти по площади, добыча жидкости по площади, закачка воды по площади и забойное давление.

Важно определить не только наличие связи, но и выяснить её причинность, то есть ответить на вопрос, какие параметры разработки изменяются под влиянием вариаций сейсмической активности, и, наоборот, изменение каких параметров разработки само приводит к активизации сейсмичности. Для этого следует рассчитать коэффициенты корреляции сейсмической активности и избранных параметров разработки при условии сдвига сейсмической активности и параметров разработки относительно друг друга по времени. В результате, если при сдвиге изменения сейсмической активности вперёд во времени относительно изменения определенного параметра

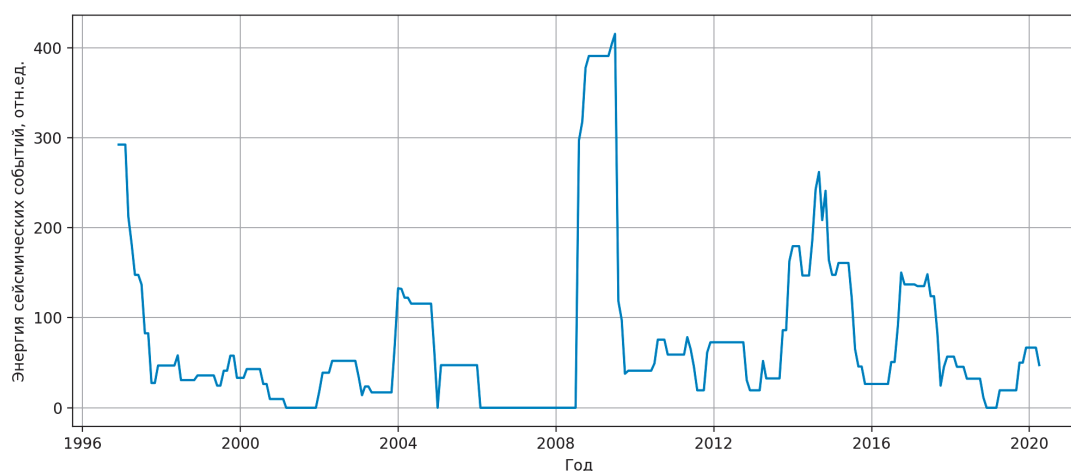


Рис. 3. Изменение сейсмической активности региона за период с 1996 по 2020 г.

разработки значение коэффициента корреляции будет расти, то с большей вероятностью можно утверждать, что изменение сейсмической активности повлекло изменение анализируемого параметра разработки. И наоборот, при увеличении корреляции в случае сдвига сейсмической активности назад во времени с большей вероятностью можно утверждать, что изменение процесса разработки месторождения повлекло за собой изменение сейсмической активности. Также интересны значения коэффициентов корреляции, получаемых для наборов данных без временных сдвигов, так как в случае максимальных значений коэффициента корреляции без сдвига по времени можно утверждать о моментальной взаимосвязи сейсмичности и рассматриваемого параметра разработки.

В связи с отсутствием измерений сейсмической активности за 2006–2008 гг., все имеющиеся данные были поделены на две части и рассматривались по отдельности для временных интервалов до 2006 года и после 2008 года, соответственно. В качестве периода сдвига (лага)

была принята величина в 1 месяц.

При расчёте коэффициентов корреляции, анализируемые показатели разработки, как и сейсмичность, были осреднены в скользящем окне периодом в 12 месяцев и нормированы на средние значения за весь период. Результаты корреляционного анализа для данных с 1996 по 2006 гг. и с 2008 по 2020 гг. представлены на рисунках 4 и 5 соответственно.

Результаты и обсуждение

Рассматривая данные, накопленные за период с 1996 по 2006 год (рис. 4), можно выделить ряд параметров разработки (добыча нефти, добыча жидкости, обводненность, эффективность закачки, дисбаланс, действующий нагнетательный фонд, средняя добыча жидкости по скважинам, средняя закачка воды по скважинам), для которых характерен рост абсолютных значений коэффициентов корреляции с положительным сдвигом сейсмичности по времени. В данном случае можно говорить о влиянии

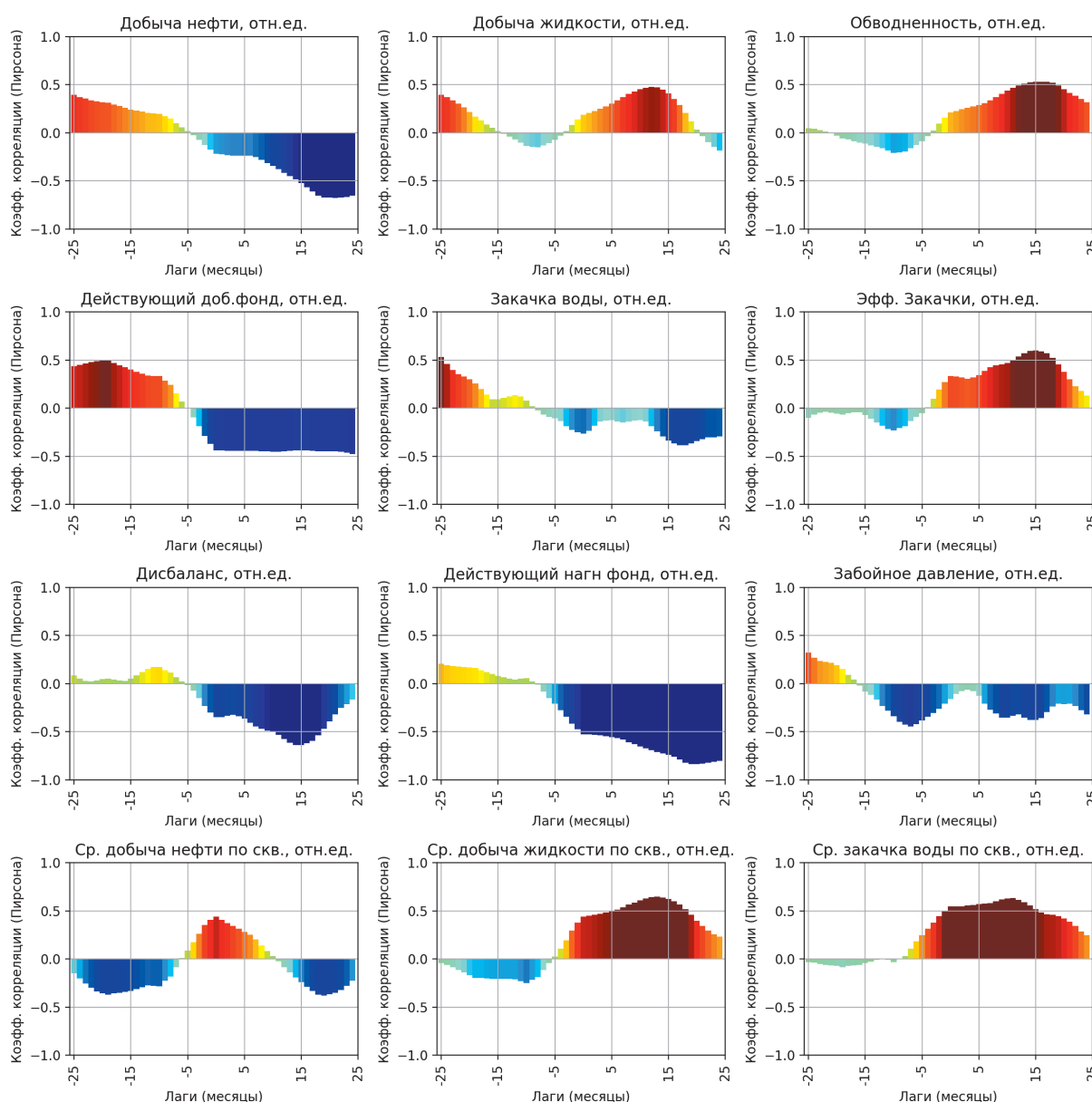


Рис. 4. Изменение коэффициентов корреляции сейсмичности и параметров разработки Альметьевской площади в зависимости от смещения параметра сейсмической активности относительно параметров разработки во времени. Рассматриваются сейсмические события, произошедшие за 1996–2006 гг.

сейсмической активности на вышеуказанные параметры для рассматриваемой площади. Исключением является нагнетательный фонд, изменение которого не может быть следствием изменения сейсмической активности. Максимальные значения коэффициентов корреляции для вышеуказанных параметров разработки находятся в диапазоне 0.45–0.8, что в целом показывает наличие некоторой взаимосвязи сейсмичности с данными параметрами.

Для таких параметров разработки, как действующий добывающий фонд, закачка воды и забойное давление, происходит относительный рост абсолютных значений коэффициента корреляции при отрицательном сдвиге сейсмичности по времени, что может говорить о некотором влиянии данных параметров разработки на сейсмическую активность. Однако, данное влияние либо имеет значительный лаг по времени, как в случае с закачкой воды, либо выражено в сравнительно невысоких значениях коэффициентов корреляции, которые не превышают 0.5.

Отдельно выделяется такой параметр, как средняя добыча нефти по скважинам, который с коэффициентом корреляции ~ 0.45 показывает практически моментальную связь с сейсмической активностью.

Рассматривая данные, накопленные за период с 2008 по 2020 год (рис. 5), можно отметить менее выраженную корреляционную взаимосвязь сейсмической активности и параметров разработки по сравнению с периодом с 1996 по 2006 год с абсолютными значениями коэффициентов корреляции, не превышающими 0.5. Тем не менее, для таких параметров, как добыча нефти, действующий нагнетательный фонд и средняя закачка воды по скважинам, наблюдается сохранение корреляционного тренда во втором периоде измерений – это увеличение коэффициента корреляции при положительном сдвиге сейсмичности. Тренд увеличения коэффициента корреляции при отрицательном сдвиге сейсмичности сохраняется для забойного давления, но знак коэффициента корреляции меняется. Это может

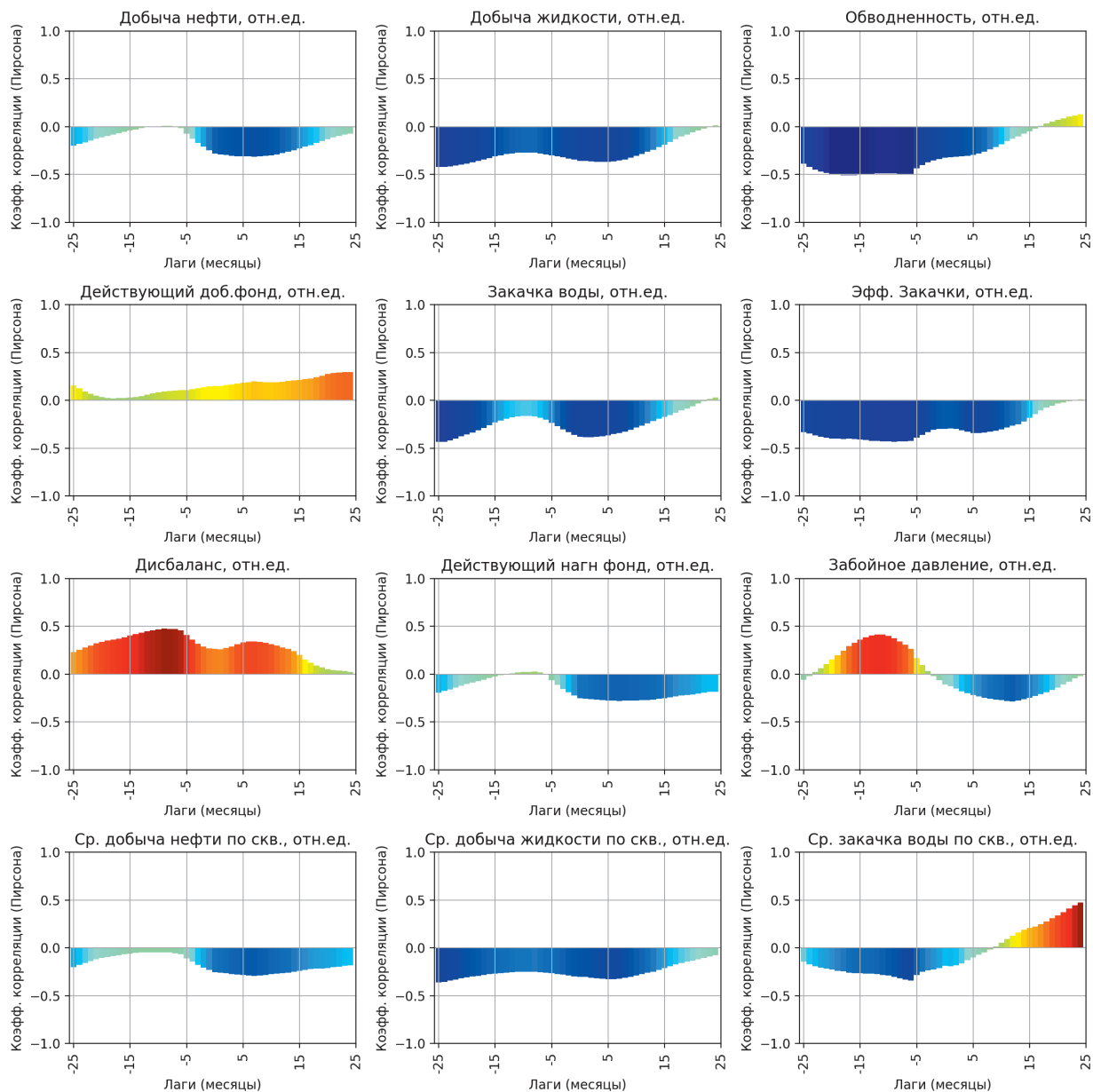


Рис. 5. Изменение коэффициентов корреляции сейсмичности и параметров разработки Альтеевской площади в зависимости от смещения параметра сейсмической активности относительно параметров разработки во времени. Рассматриваются сейсмические события, произошедшие за 2008–2020 гг.

говорить как о нестабильности и случайности взаимосвязи сейсмичности с забойным давлением, так и о более сложном и неочевидном характере такой взаимосвязи.

Такие параметры как добыча жидкости, обводненность, действующий добывающий фонд, закачка воды, эффективность закачки, дисбаланс, средняя добыча нефти по скважинам и средняя добыча жидкости по скважинам не показывают сохранения корреляционного тренда при переходе от наблюдений за период с 1996 по 2006 год к периоду с 2008 по 2020 год. Это вкупе с невысокими значениями коэффициентов корреляции не позволяет утверждать об устойчивости взаимосвязи данных параметров с изменением сейсмической активности.

Выводы

Корреляционный анализ позволил выявить взаимосвязь параметров разработки и сейсмичности для Альметьевской площади Ромашкинского нефтяного месторождения. При этом максимальные значения коэффициентов корреляции и интегральной характеристики сейсмической активности для рассматриваемых параметров достигают 0.8 при смещении сейсмичности относительно анализируемых параметров разработки до 2х лет. Ограничиваясь полугодовым периодом смещения, видно, что максимальные коэффициенты корреляции редко превышают 0.5 и в общей массе находятся ниже 0.6 (рис. 4, 5). Это говорит о статистически достаточно средней взаимосвязи сейсмичности и каждого из рассматриваемых параметров в отдельности, что в масштабе всей разрабатываемой площади не позволяет однозначно прогнозировать изменение того или иного параметра разработки исходя из изменений сейсмичности и наоборот.

Вместе с тем, проведенный анализ выявил устойчивые зависимости добычи нефти, действующего нагнетательного фонда и средней закачки воды по скважинам с сохранением корреляционного тренда в обоих периодах измерений. Это дает основание считать, что при более детальном рассмотрении связи сейсмической активности с параметрами разработки с учётом пространственного распределения данных параметров, связь между сейсмической активностью и процессами разработки месторождений углеводородов на территории Юго-Востока Татарстана может проявиться в большей степени.

Финансирование/Благодарности

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в соответствии с Соглашением № 075-11-2019-032 от 26.11.2019 г. в рамках проекта «Создание высокотехнологичного программно-аппаратного комплекса на основе нейросетевых алгоритмов для повышения эффективности разработки крупных месторождений углеводородов на поздней стадии».

Авторы выражают благодарность рецензентам и редактору за детальный анализ рукописи, замечания и рекомендации, которые позволили улучшить качество опубликованной статьи.

Литература

Мирзоев К.М., Гатиятуллин Н.С., Тарасов Е.А., Степанов В.П., Гатиятуллин Р.Н., Рахматуллин М.Х., Кожевников В.А. (2004).

Сейсмическая опасность территории Татарстана, *Георесурсы*, 1(15), с. 45–48.

Хисамов Р.С., Гатиятуллин Н.С., Кузьмин Ю.О., Бакиров Р.Х., Гатиятуллин Р.Н., Рахматуллин М.Х., Баратов А.Р., Кашуркин П.И. (2012). Современная геодинамика и сейсмичность юго-востока Татарстана Казань: Фэн, 240 с.

Adushkin V.V., Rodionov V.N., Turuntaev S., Yudin A.E. (2000). Seismicity in the oil field. *Oilfield Rev.*, 12(2), pp. 2–17.

Aki K. (1965). Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N=a-bM$ and its confidence limits. *Bull. Earthq. Res.*, 43, pp. 237–239.

Ellsworth W.L. (2013). Injection-induced earthquakes. *Science*, 341, pp. 142–149. <https://doi.org/10.1126/science.1225942>

Grasso J.R. (1992b). Mechanics of seismic instabilities induced by the recovery of hydrocarbons. *Pure Appl. Geophys.*, 139(3–4), pp. 507–534. <https://doi.org/10.1007/BF00879949>

Gutenberg R., Richter C.F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 34, pp. 185–188. <https://doi.org/10.1785/BSSA0340040185>

Keranen K.M. and Weingarten M. (2017). Induced seismicity, *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 46, pp. 149–174. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-082517-010054>

Mignan A., Woessner J. Estimating the magnitude of completeness in earthquake catalogs, Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis. doi:10.5078/corssa-00180805

Mousavi S.M., Ogwari P.O., Horton S.P. & Langston C.A. (2017). Spatio-temporal evolution of frequency magnitude distribution and seismogenic index during initiation of induced seismicity at Guy Greenbrier, Arkansas. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 267, pp. 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2017.04.005>

Ognev I., Stepanov A., Novikova S. (2020). Relation of South-East Tatarstan's seismicity to the Almet'yevskaya Area's oil field development parameters. *SGEM Conference proceedings*. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/1.2/s06.095>

Rautian T.G., Khalturin V.I., Fujita K., Mackey K.G. & Kendall A.D. (2007). Origins and Methodology of the Russian Energy K-Class System and Its Relationship to Magnitude Scales. *Seismol. Res. Lett.*, 78(6), pp. 579–590. <https://doi.org/10.1785/gssrl.78.6.579>

Rydelek P.A., Sacks I.S. (1989). Testing the completeness of earthquake catalogs and the hypothesis of self-similarity. *Nature*, 337, pp. 251–253. <https://doi.org/10.1038/337251a0>

Suckale J. (2009). Induced seismicity in hydrocarbon fields. *Adv. Geophys.*, 51, pp. 55–106. [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(09\)05107-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(09)05107-3)

U.S. Geological Survey (2021). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global. <https://doi.org/10.5066/F7PR7TFT>

Wiemer S. (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismol. Res. Lett.*, 72(3), pp. 373–382. <https://doi.org/10.1785/gssrl.72.3.373>

Wiemer S., Wyss M. (2000). Minimum magnitude of complete reporting in earthquake catalogs: examples from Alaska, the Western United States, and Japan. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90, pp. 859–869. <https://doi.org/10.1785/0119990114>

Woessner J., Wiemer S. (2005). Assessing the quality of earthquake catalogues: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 95. <https://doi.org/10.1785/0120040007>

Сведения об авторах

Игорь Николаевич Огнев – старший преподаватель кафедры разработки и эксплуатации месторождений трудноизвлекаемых углеводородов института геологии и нефтегазовых технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 4/5

Алексей Игоревич Степанов – инженер 1 категории Центра дополнительного образования, менеджмента качества и маркетинга института геологии и нефтегазовых технологий

Казанский (Приволжский) федеральный университет
Россия, 420008, Казань, ул. Кремлевская, д. 4/5

Статья поступила в редакцию 12.11.2020;

Принята к публикации 12.10.2021;

Опубликована 30.11.2021

Seismicity and development of Romashkino hydrocarbon field's Almet'yevskaya area

I.N. Ognev*, A.I. Stepanov

Kazan Federal University, Kazan, Russian Federation

*Corresponding author: Igor N. Ognev, e-mail: ognev.igor94@gmail.com

Abstract. The relationship between the various human activities and seismic activity has become more evident in the last several decades. One of the important domains where such a relationship manifests itself is hydrocarbon fields' development. South East Tatarstan (Russia) is a region where the link between seismicity and the development of the giant Romashkino hydrocarbon field has been established. The goal of the current study is to conduct the causative analysis between the seismic activity and the development of the Romashkino hydrocarbon field's Almet'yevskaya area which is located in the most seismically active zone of the south-eastern Tatarstan.

Keywords: seismicity, hydrocarbon field development, induced seismicity, Romashkino oilfield

Acknowledgements

The work was carried out with the financial support of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation in accordance with Agreement No. 075-11-2019-032 of 26.11.2019 within the framework of the project "Creation of a high-tech software and hardware complex based on neural network algorithms to improve the efficiency of the development of large hydrocarbon deposits at a late stage".

The authors express their gratitude to the reviewers and editor for the thorough analysis of the manuscript and recommendations which allowed to enhance the quality of the published paper.

Recommended citation: Ognev I.N., Stepanov A.I. (2021). Seismicity and development of Romashkino hydrocarbon field's Almet'yevskaya area. *Georesursy = Georesources*, 23(4), pp. 51–57. DOI: <https://doi.org/10.18599/grs.2021.4.6>

References

- Adushkin V.V., Rodionov V.N., Turuntaev S., Yudin A.E. (2000). Seismicity in the oil field. *Oilfield Rev.*, 12(2), pp. 2–17.
- Aki K. (1965). Maximum likelihood estimate of b in the formula $\log N = a - bM$ and its condense limits. *Bull. Earthq. Res.*, 43, pp. 237–239.
- Ellsworth W.L. (2013). Injection-induced earthquakes. *Science*, 341, pp. 142–149. <https://doi.org/10.1126/science.1225942>
- Grasso J.R. (1992b). Mechanics of seismic instabilities induced by the recovery of hydrocarbons. *Pure Appl. Geophys.*, 139(3–4), pp. 507–534. <https://doi.org/10.1007/BF00879949>
- Gutenberg R., Richter C.F. (1944). Frequency of earthquakes in California. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 34, pp. 185–188. <https://doi.org/10.1785/BSSA0340040185>
- Keranen K.M. and Weingarten M. (2017). Induced seismicity. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 46, pp. 149–174. <https://doi.org/10.1146/annurev-earth-082517-010054>

Khisamov R.S., Gatiyatullin N.S., Kuzmin Yu.O., Bakirov R.Kh., Gatiyatullin R.N., Rakhmatullin M.Kh., Baratov A.R., Kashurkin P.I. (2012). Modern geodynamics and seismicity of the southeast of Tatarstan. Kazan: Fen, 240 p. (In Russ.)

Mignan A., Woessner J. Estimating the magnitude of completeness in earthquake catalogs, Community Online Resource for Statistical Seismicity Analysis. doi:10.5078/corssa-00180805

Mirzoev K.M., Gatiyatullin N.S., Tarasov E.A., Stepanov V.P., Gatiyatullin R.N., Rakhmatullin M.Kh., Kozhevnikov V.A. (2004). Seismic hazard of the Tatarstan's territory. *Georesursy = Georesources*, 1(15), pp. 45–48. (In Russ.)

Mousavi S.M., Ogwari P.O., Horton S.P. & Langston C.A. (2017). Spatio temporal evolution of frequency magnitude distribution and seismogenic index during initiation of induced seismicity at Guy Greenbrier, Arkansas. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 267, pp. 53–66. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2017.04.005>

Ognev I., Stepanov A., Novikova S. (2020). Relation of South-East Tatarstan's seismicity to the Almet'yevskaya Area's oil field development parameters. *SGEM Conference proceedings*. <https://doi.org/10.5593/sgem2020/1.2/s06.095>

Rautian T.G., Khalturin V.I., Fujita K., Mackey K.G. & Kendall A.D. (2007). Origins and Methodology of the Russian Energy K-Class System and Its Relationship to Magnitude Scales. *Seismol. Res. Lett.*, 78(6), pp. 579–590. <https://doi.org/10.1785/gssrl.78.6.579>

Rydelek P.A., Sacks I.S. (1989). Testing the completeness of earthquake catalogs and the hypothesis of self-similarity. *Nature*, 337, pp. 251–253. <https://doi.org/10.1038/337251a0>

Suckale J. (2009). Induced seismicity in hydrocarbon fields. *Adv. Geophys.*, 51, pp. 55–106. [https://doi.org/10.1016/S0065-2687\(09\)05107-3](https://doi.org/10.1016/S0065-2687(09)05107-3)

U.S. Geological Survey (2021). Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) 1 Arc-Second Global. <https://doi.org/10.5066/F7PR7TFT>

Wiemer S. (2001). A software package to analyze seismicity: ZMAP. *Seismol Res Lett.*, 72(3), pp. 373–382. <https://doi.org/10.1785/gssrl.72.3.373>

Wiemer S., Wyss M. (2000). Minimum magnitude of complete reporting in earthquake catalogs: examples from Alaska, the Western United States, and Japan. *Bull. Seism. Soc. Am.*, 90, pp. 859–869. <https://doi.org/10.1785/0119990114>

Woessner J., Wiemer S. (2005). Assessing the quality of earthquake catalogues: Estimating the magnitude of completeness and its uncertainty. *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 95. <https://doi.org/10.1785/0120040007>

About the Authors

Igor N. Ognev – Senior Lecturer, Department of Development and Operation of Hard-to-Recover Hydrocarbons, Institute of Geology and Oil and Gas Technologies, Kazan Federal University, 4/5 Kremlevskaya st., Kazan, 420008, Russian Federation

Alexey I. Stepanov – Engineer, Center for advanced training, quality management and marketing, Institute of Geology and Oil and Gas Technologies, Kazan Federal University, 4/5 Kremlevskaya st., Kazan, 420008, Russian Federation

Manuscript received 12 November 2020;

Accepted 12 October 2021; Published 30 November 2021