

УДК 553.98:551.2

Влияние разработки месторождений УВ–сырья на геодинамическое состояние и сейсмический режим земной коры Южного Предуралья

© 2021 г. М.Ю. Нестеренко¹, О.А. Капустина¹, С.Э. Никифоров²

¹ОФИЦ УрО РАН, г. Оренбург, Россия; ²НИТУ «МИСИС», г. Москва, Россия

Поступила в редакцию 02.11.2020 г.

Аннотация. Представлены результаты анализа влияния разработки месторождений углеводородов (УВ) на геодинамическое состояние и сейсмическую активность земной коры Южного Предуралья, сопоставлены показатели разработки месторождений, техногенные изменения в недрах района месторождений с уровнем сейсмической активности, выявлена связь между показателями разработки месторождений и параметрами сейсмической активности земной коры, и проведён статистический анализ сейсмического режима района месторождений УВ–сырья. Корреляционный анализ показателей разработки месторождения и параметров сейсмической активности выявил практически линейную связь ($r > 0.9$) между пластовым давлением и количеством событий (в том числе импульсных с малой энергией) и тесную связь между средним дебетом и количеством событий. Построена модель сейсмической активности месторождений УВ в Южном Предуралье в виде комплекса графиков повторяемости сейсмических событий и изменения их угла наклона. Построенная модель указывает на изменение характера сейсмической активности недр района месторождений, состоящее в снижении энергии происходящих событий и увеличении их количества. Выявлена цикличность сейсмической активности территории Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения (ОНГКМ). В настоящее время происходит накопление напряжения, связанного с продолжающимся падением пластового давления при эксплуатации месторождения и природными тектоническими процессами на фоне снижения темпов добычи УВ. Сокращение объёмов добычи на ОНГКМ, не уменьшая техногенной нагрузки на земную кору, снижает скорость накопления напряжений. Это приводит к уменьшению энергии сейсмических событий и повышению их количества (с учётом импульсов).

Ключевые слова: геологическая среда, сейсмическая активность, гидрогеодинамические процессы, месторождения нефти и газа, Южный Урал.

Для цитирования: Нестеренко М.Ю., Капустина О.А., Никифоров С.Э. Влияние разработки месторождений УВ–сырья на геодинамическое состояние и сейсмический режим земной коры Южного Предуралья // Российский сейсмологический журнал. – 2021. – Т. 3, № 3. – С. 75–83. DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.3.05>

Введение

В процессе длительной разработки месторождений нефти и газа снижается пластовое давление и происходит обводнение скважин. С уменьшением давления в водной системе на месторождениях углеводородов (УВ) и прилегающих к ним водоносных горизонтах уменьшается противодействие литостатическому проседанию выше расположенных горных пород и вспучиванию малопроницаемой подошвы месторождения под действием сохранившегося высокого давления глубже расположенных водоносных горизонтов [Нестеренко М. и др., 2015].

В соответствии с результатами исследований, выполняемыми в Южном Предуралье с использованием сети «Нефтегаз–сейсмика», состоящей из девяти сейсмических станций и сети пунктов GNSS-наблюдений, за движением земной коры на примере месторождений нефти и газа Южного Предуралья [Нестеренко Ю. и др., 2014; Нестеренко Ю., Нестеренко М., 2017; Nesterenko M., Nesterenko Y., 2019], плотность зарегистрированных событий и выделившейся сейсмической энергии в зоне гидрогеодинамических воронок на Оренбургском нефтегазоконденсатном месторождении (ОНГКМ) и других месторождений УВ значительно уменьшается с удалением от их центра. Данная тенденция подтверждается также

наблюдениями в 2015–2019 гг., следовательно, уменьшение пластового давления в разрабатываемых месторождениях увеличило градиент давления между пластовыми водами месторождения и прилегающими к ним водоносными комплексами и привело к формированию примерно на эту же величину некомпенсированного напряжения во вмещающих горных породах, которое разгружается увеличением сейсмической активности в районе гидродинамической воронки. Выполненный по данным на конец 2015 г. анализ с учётом статистического распределения сейсмических событий на территории исследований показал, что наибольшая сейсмическая активность наблюдается на территориях с наибольшим падением пластового давления и в районах разломов, по которым оно распространяется за пределы месторождений. Это указывает на доминирующую роль водной системы в формировании напряжённо-деформационного состояния, геодинамической и сейсмической активности земной коры в районах добычи УВ [Нестеренко М. и др., 2015].

Цель исследований – выявить и исследовать связь между показателями разработки месторождений и параметрами сейсмической активности земной коры и провести статистический анализ сейсмического режима района месторождений УВ-сырья.

Материалы и методы

В районе ОНГКМ в настоящее время после последней разрядки напряжений, спровоцированной взрывами на Донгузском военном полигоне в 2010–2012 гг., и снижения сейсмической активности в 2012–2015 гг. наблюдалось незначительное повышение сейсмической активности в 2017 г. и её снижение в 2018–2019 гг. Как известно, сейсмическая активность Земли в целом и её локальных участков имеет ярко выраженную цикличность. Возможно, в настоящее время происходит накопление напряжения, связанного с продолжающимся падением пластового давления при эксплуатации месторождения и природными тектоническими процессами на фоне снижения темпов добычи УВ. Сокращение объёмов добычи, не уменьшая техногенной нагрузки на земную кору, снижает скорость накопления напряжений. Это приводит к уменьшению энергии сейсмических событий и повышению их количества. Большая удалённость сейсмических станций друг от друга, обусловленная низкой их плотностью, не позволяет регистрировать все сейсмические явле-

ния с невысокой энергией одновременно двумя и более сейсмическими станциями.

Исследование распределения числа событий в единицу времени N и его связи с этапами развития сейсмического процесса в геологической среде выполняли ряд исследователей [Виноградов, 1980; Соболев, 1993; Завьялов, 2006]. Исследования проводились на образцах горных пород, в рудных и угольных шахтах и для сейсмоактивных регионов. Явление затишья (снижение числа событий в единицу времени) наблюдалось в большинстве экспериментов [Виноградов и др., 1975], проведённых в условиях длительно действующей нагрузки на образец горной породы перед макроразрушением образца, в условиях рудных и угольных шахт перед горными ударами [Виноградов, 1957; 1963] и в различных сейсмоактивных регионах перед сильными землетрясениями или их роями [Inouye, 1965; Mogi, 1968; Федотов и др., 1969; Завьялов, 2006]. Хотя достоверных статистических оценок предвестников такого типа не приводится.

В соответствии с [Завьялов, 2006] и другими работами, график изменения наклона γ графика повторяемости является прогностическим признаком крупных землетрясений. Однако для платформенных территорий с низким уровнем сейсмической активности такие исследования провести сложно в силу малого периода инструментальных наблюдений и небольшого числа происходящих землетрясений. Но, в соответствии с моделью поведения параметра γ , его увеличение указывает на повышение количества событий с низкой магнитудой относительно числа событий с высокой магнитудой, что свидетельствует о накоплении напряжений в геологической среде. Последняя разрядка напряжений была зарегистрирована в объёме ОНГКМ в 2010 г. и спровоцирована взрывами при уничтожении старых снарядов на Донгузском военном полигоне, расположенном в южной части лицензионного участка ОНГКМ (рис. 1).

Полнота регистрируемых сейсмических событий определяется чувствительностью сети сейсмических станций, которая в свою очередь зависит от характеристик её аппаратного обеспечения. Поэтому в ряде случаев очень слабые или удалённые события могут быть не зарегистрированы, а наиболее сильные события возникают нечасто, и вероятность зарегистрировать такое событие за короткий интервал времени невысока.

По результатам наблюдений сети сейсмических станций в Южном Предуралье [Нестеренко М., 2015; Габсатарова и др., 2019] с использованием

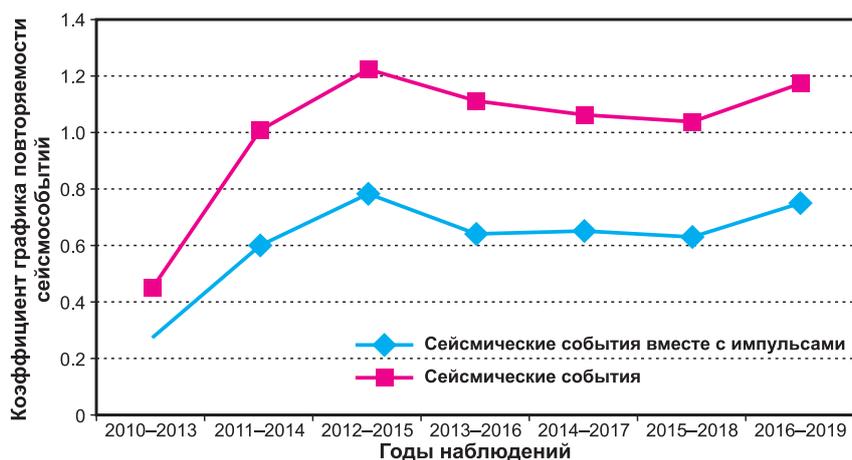


Рис. 1. Изменения наклона графика повторяемости, рассчитанные в скользящем временном окне $\Delta T=4$ года с шагом $\Delta t=1$ год на территории Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения 2010–2019 гг.

Таблица 1. Распределение сейсмических событий на Оренбургском нефтегазоконденсатном месторождении в зависимости от их магнитуды за период 2016–2018 гг.

Диапазон магнитуд, M_L	0–0.5	0.5–1	1–1.5	1.5–2	2–2.5
Количество сейсмических событий, N	1	29	8	1	2
Логарифм числа сейсмических событий, $\lg N$	0	1.46	0.9	0	0.3

Таблица 2. Распределение сейсмических событий на Байтуганском месторождении углеводородов в зависимости от их магнитуды за период 2016–2018 гг.

Диапазон магнитуд, M_L	0–0.5	0.5–1	1–1.5	1.5–2	2–2.5
Количество сейсмических событий, N	2	17	2	1	0
Логарифм числа сейсмических событий, $\lg N$	0.3	1.23	0.3	0	–

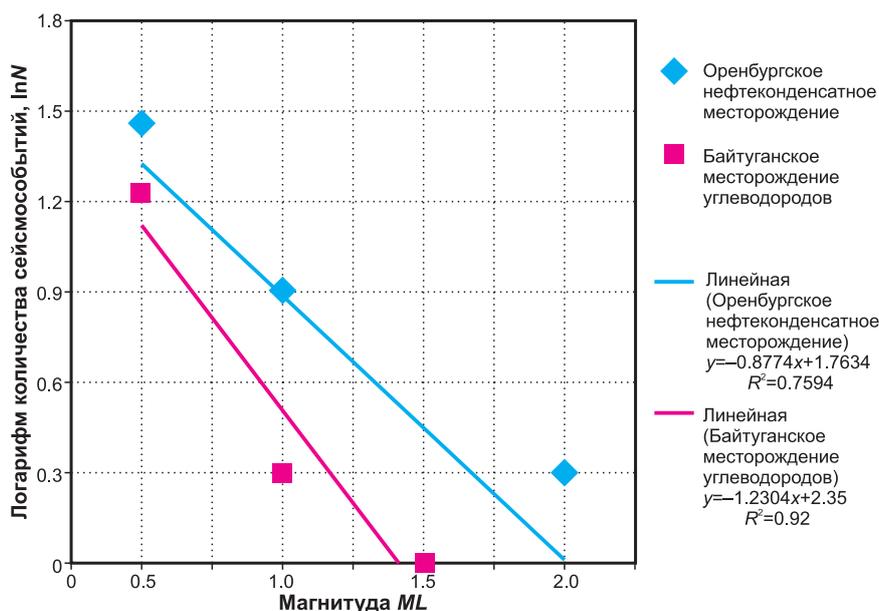


Рис. 2. График повторяемости сейсмических событий на Оренбургском нефтегазоконденсатном и Байтуганском месторождениях Оренбургской области за период 2016–2018 гг.

общеизвестных методов оценки сейсмического режима для природных и техногенных сейсмических событий, зарегистрированных в районах Оренбургского нефтегазоконденсатного и Байтуганского месторождений, были рассчитаны распределения сейсмических событий в зависимости от магнитуды и представлены в табл. 1 и 2 соответственно.

По данным, представленным в табл. 1 и 2, построены графики повторяемости сейсмических событий за период 2016–2018 гг. для рассматриваемых месторождений углеводородов (рис. 2).

Выделяя линейные участки, получаем следующие зависимости логарифма числа сейсмических событий от магнитуды:

– для Оренбургского НГКМ:

$$\lg N = 1.76 - 0.88 \cdot ML;$$

– для Байтуганского месторождения:

$$\lg N = 2.35 - 1.23 \cdot ML.$$

Невысокая плотность сейсмических станций не позволяет регистрировать все сейсмические явления двумя и более сейсмическими станциями. Построенные модели сейсмической активности месторождений не учитывают импульсные сейсмические события с невысокой энергией, зарегистрированные одной станцией. На рис. 3

представлена уточнённая модель сейсмической активности на Оренбургском НГКМ. Красным пунсоном обозначено количество сейсмических событий, зарегистрированных двумя и более станциями. Отмеченный уровень расположен значительно ниже прямой повторяемости. Это указывает на недостаточную чувствительность сети в диапазоне $ML < 0.5$. В уточнённой модели количество сейсмических событий, зарегистрированных двумя и более станциями в диапазоне магнитуд до 0.5, увеличено за счёт числа импульсных сейсмических событий с невысокой энергией, зарегистрированных одной станцией. Построенная модель указывает на изменение характера сейсмической активности недр района месторождений, состоящее в снижении энергии происходящих событий и увеличении их количества.

Для землетрясений, зарегистрированных на рассматриваемых месторождениях, наблюдается сильное отклонение от прямой, отражающей линейную взаимосвязь между магнитудой и числом событий (рис. 3) в области слабых сейсмических событий с магнитудой менее 0.5. Это свидетельствует о неполноте данных о слабых событиях и недостаточной плотности сейсмостанций и возможности сети регистрировать сейсмические явления с низкой энергией

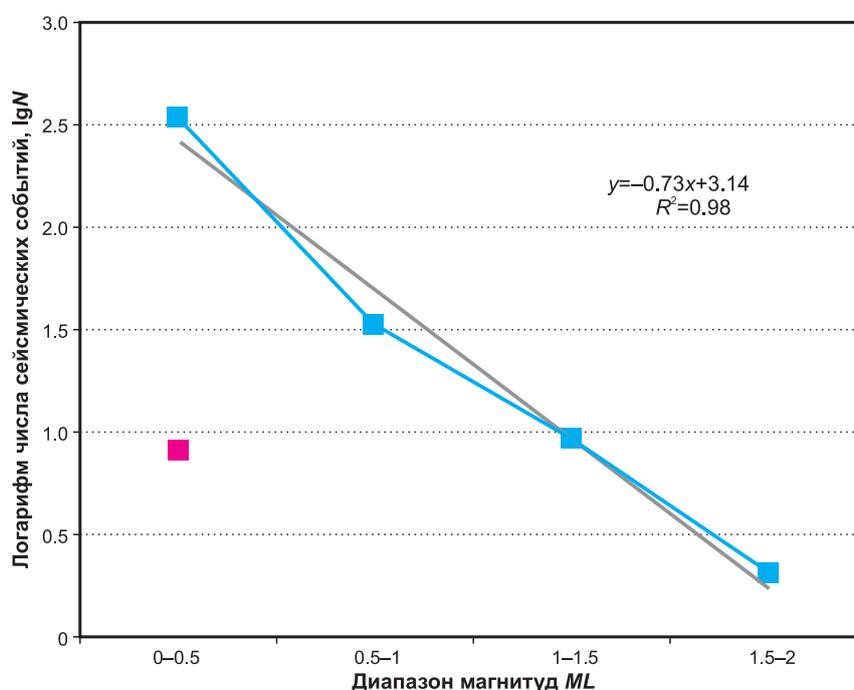


Рис. 3. График повторяемости сейсмических событий на Оренбургском нефтегазовом месторождении за период 2017–2019 гг.

Красным квадратом отмечено количество сейсмических событий с $ML < 0.5$, зарегистрированных двумя и более станциями

одновременно двумя и более станциями. Неполноту данных может восполнить учёт импульсных событий. На рис. 3 построен график повторяемости, учитывающий число импульсных событий (событий, зарегистрированных одной станцией) на территории исследований.

Таким образом, для проведения аналитической обработки сейсмических природных и индуцированных событий, полученных в результате регистрации сетью «Нефтегаз-сейсмика», необходимо считать представительной регистрацию событий с магнитудой в диапазоне от 0.5 до 2.

Проведённый анализ каталогов с информацией о сейсмических событиях, зарегистрированных сейсмической сетью, позволил:

1 – определить диапазон представительных магнитуд сейсмических событий $M \in [0.5; 2]$, регистрируемых сетью «Нефтегаз-сейсмика» за период с 2010 по 2019 г. для Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения, для Байтуганского месторождения за период наблюдений 2016–2018 гг.;

2 – построить линейную зависимость повторяемости землетрясений на Оренбургском нефтегазоконденсатном месторождении и уточнить величину наклона графика повторяемости землетрясений, которая составляет 0.88;

3 – построить линейную зависимость повторяемости землетрясений для Байтуганского месторождения углеводородов и впервые предварительно оценить величину наклона графика повторяемости землетрясений, которая составил 1.23;

4 – коэффициент наклона графика повторяемости, который является одним из основных показателей сейсмического режима, имеет в обоих случаях абсолютное значение, значительно превышающее обычную для естественной сейсмичности величину 0.75, что характерно для техногенной и техногенно-индуцированной сейсмичности, например, для Ромашкинского и других месторождений нефти [Адушкин, 2000; Садовский, 1991].

Результаты и обсуждение

Наблюдается цикличность сейсмической активности в период с 2010 по 2019 год. Такая тенденция, возможно, связана с изменением уровня антропогенных воздействий (снижение объёмов добычи УВ-сырья) на земную кору и неравномерностью их проявления по территории добычи полезных ископаемых.

Для выяснения причин изменений в характере разгрузки напряжений и выделении сейсмической энергии необходимы сопоставление и взаимный анализ результатов сейсмического мониторинга территории исследований и истории разработки месторождения. Однако, принимая во внимание цикличность сейсмической активности, происходит накопление напряжений с возможной последующей разрядкой.

Выполнен анализ влияния разработки месторождения на геодинамическое состояние и сейсмическую активность земной коры в районе ОНГКМ. Сопоставлены показатели разработки месторождения, техногенные изменения в недрах района ОНГКМ с уровнем сейсмической активности.

Сейсмическую активность характеризуем следующими показателями:

1 – природно-техногенные события (ПТС), шт. – общее количество зарегистрированных сейсмических событий на Оренбургском нефтегазоконденсатном месторождении по годам с 2010 по 2017 г.;

2 – средняя продолжительность сейсмических событий, c ;

3 – импульсы – общее количество слабых сейсмических событий, зарегистрированных одной сейсмостанцией, $шт.$;

4 – совокупность природно-техногенных сейсмических событий и импульсов по годам с 2010 по 2017 г., $шт.$

Выполнен статистический корреляционный анализ вышеперечисленных показателей в целом для всего месторождения (табл. 3).

В табл. 3 рассчитаны коэффициенты корреляции между различными показателями разработки (средний дебет, годовая и накопленная добыча газа, конденсата и воды, пластовое давление и др.) с количеством зарегистрированных природно-техногенных и импульсных событий и их продолжительностью. В таблице выделены жирным шрифтом коэффициенты корреляции больше 0.6.

Корреляционный анализ показателей разработки месторождения и параметров сейсмической активности выявил практически линейную связь ($r > 0.9$) между пластовым давлением и количеством событий (в том числе импульсных с малой энергией) и тесную связь между средним дебетом и количеством событий.

Очевидной является необходимость дальнейшего детального исследования выявленных зависимостей с целью выявления причин влияния, выявления географической составляющей по зонам УКПГ и др.

Таблица 3. Анализ влияния показателей разработки на параметры сейсмической активности Оренбургского НГКМ

Год	Средний дебит			Годовая добыча			Накопленная добыча		
	газ, тыс. м ³ /сут	нестаб. конденс., т	вода, м ³ /сут	газ сепарации, млрд м ³	нестаб. конденс., млн т	вода, млн м ³	газ сепарации, млрд м ³	нестаб. конденс., млн т	вода, млн м ³
2010	74.379	0.938	13.876	17.306	0.218	0.772	1181.469	44.730	24.149
2011	71.503	0.890	13.167	16.677	0.208	0.686	1198.146	44.938	24.836
2012	67.468	0.788	11.616	16.061	0.187	0.584	1214.208	45.125	25.419
2013	64.694	0.685	11.102	15.251	0.161	0.567	1229.459	45.287	25.986
2014	62.762	0.526	10.814	14.494	0.121	0.529	1243.953	45.408	26.515
2015	59.716	0.442	9.328	13.438	0.099	0.506	1257.391	45.508	27.021
2016	58.156	0.450	9.415	12.777	0.099	0.477	1270.232	45.552	27.498
2017	55.416	0.423	8.996	12.000	0.092	0.435	1282.232	45.643	27.933
Коэффициенты корреляции									
Природно-техногенные события, шт.	0.286	0.251	0.331	0.169	0.215	0.437	-0.254	-0.380	-0.266
Средняя продолжительность сейсмических событий, с	0.332	0.432	0.306	0.408	0.452	0.269	-0.368	-0.303	-0.363
Импульсы, шт.	0.864	0.941	0.841	0.859	0.938	0.875	-0.860	-0.915	-0.859
Природно-техногенные события+импульсы, шт.	0.763	0.870	0.758	0.751	0.860	0.773	-0.748	-0.820	-0.745

Продолжение таблицы 3.

Год	Пластовое давление, МПа		Количество действующих скважин в течение года, ед.		К.э., доли ед.	Темп отбора от остаточных геологических запасов газа, %	Степень выработки геологических запасов газа, %
	по залежи	в зоне дренирования	всего	с водой			
2010	6.810	5.880	744	192	0.877	2.983	67.735
2011	6.540	5.640	747	191	0.873	2.963	68.691
2012	6.370	5.410	744	176	0.889	2.941	69.612
2013	6.240	5.230	741	170	0.886	2.877	70.486
2014	5.750	4.940	738	165	0.873	2.816	71.317
2015	5.550	4.740	728	184	0.858	2.686	72.088
2016	5.680		733	181	0.838	2.625	72.824
2017	5.470		737	181	0.832	2.532	73.512
Коэффициенты корреляции							
Природно-техногенные события, шт.	0.301	0.623	0.071	0.575	-0.249	0.035	-0.254
Средняя продолжительность сейсмических событий, с	0.480	0.243	0.446	-0.169	0.578	0.457	-0.368
Импульсы, шт.	0.984	0.988	0.539	-0.590	0.800	0.849	-0.860
Природно-техногенные события+импульсы, шт.	0.945	0.991	0.519	-0.519	0.667	0.744	-0.748

Выводы

1. Выявлена цикличность сейсмической активности территории Оренбургского нефтегазоконденсатного месторождения (ОНГКМ). В настоящее время происходит накопление напряжения, связанного с продолжающимся падением пластового давления при эксплуатации месторождения и природными тектоническими процессами на фоне снижения темпов добычи УВ. Сокращение объёмов добычи на ОНГКМ, не уменьшая техногенной нагрузки на земную кору, снижает скорость накопления напряжений. Это приводит к уменьшению энергии сейсмических событий и повышению их количества (с учётом импульсов).

2. Построена модель сейсмической активности месторождений УВ в Южном Предуралье в виде комплекса графиков повторяемости сейсмических событий и изменения их угла наклона. Построенная модель указывает на изменение характера сейсмической активности недр района месторождений, состоящее в снижении энергии происходящих событий и увеличении их количества.

3. Выполнен анализ влияния разработки месторождения на геодинамическое состояние и сейсмическую активность земной коры. Сопоставлены показатели разработки месторождения, техногенные изменения в недрах района ОНГКМ с уровнем сейсмической активности. Выполнен статистический анализ вышеперечисленных показателей в целом для всего месторождения.

4. Корреляционный анализ показателей разработки месторождения и параметров сейсмической активности выявил практически линейную связь ($r > 0.9$) между пластовым давлением и количеством событий (в том числе импульсных с малой энергией) и тесную связь между средним дебетом и количеством событий.

5. Уменьшение уровня добычи УВ-сырья и изменение применяемых технологий добычи приводят к изменению особенностей техногенных воздействий на геологическую среду, изменился и характер сейсмической активности месторождения. Это обуславливает необходимость оптимизации системы геодинамического мониторинга территории ОНГКМ.

Литература

Адушкин В.В., Родионов В.Н., Турунтаев С.Б., Юдин А.Е. Сейсмичность месторождений углеводородов // Нефтегазовое обозрение. — 2000. — № 1. — С. 7. — URL: <http://www.petrobak.com/files/88mh72lvvsfhi6lf.pdf>

Виноградов С.Д. Акустические наблюдения в шахтах Кизеловского угольного бассейна // Известия АН СССР. Серия Геофизическая. — 1957. — № 6. — С. 744–755.

Виноградов С.Д. Акустические наблюдения процессов разрушения горных пород в шахте «Анна», Чехословакия // Известия АН СССР. Серия Геофизическая. — 1963. — № 4. — С. 501–512.

Виноградов С.Д. Об изменениях сейсмического режима при подготовке разрушения // Моделирование предвестников землетрясений. — М.: Наука, 1980. — С. 169–178.

Виноградов С.Д., Мирзоев К.М., Саломов Н.Г. Исследование сейсмического режима при разрушении образцов. — Душанбе: Дониш, 1975. — 118 с.

Габсатарова И.П., Голубева И.В., Дягилев Р.А., Карпинский В.В., Конечная Я.В., Мехрюшев Д.Ю., Надёжка Л.И., Нестеренко М.Ю., Носкова Н.Н., Петров С.И., Пивоваров С.П., Пойгина С.Г., Санина И.А. Восточно-Европейская платформа, Урал и Западная Сибирь // Землетрясения России в 2017 году. — Обнинск: ФИЦ ЕГС РАН, 2019. — С. 24–29.

Завьялов А.Д. Среднесрочный прогноз землетрясений: основы, методика, реализация. — М.: Наука, 2006. — 254 с.

Нестеренко М.Ю., Нестеренко Ю.М., Соколов А.Г. Геодинамические процессы в разрабатываемых месторождениях углеводородов (на примере Южного Предуралья). — Екатеринбург: УрО РАН, 2015. — 186 с.

Нестеренко Ю.М., Нестеренко М.Ю. Подземные воды Южного Предуралья, и их гидродинамика в районах добычи углеводородов // Литосфера. — 2017. — Т. 17, № 2. — С. 125–138.

Нестеренко Ю.М., Соколов А.Г., Нестеренко М.Ю. Особенности тектоники и геодинамики отложений кунгурского яруса на месторождениях углеводородов Южного Предуралья // Литосфера. — 2014. — № 3. — С. 132–139.

Садовский М.А., Писаренко В.Ф. Сейсмический процесс в блоковой среде / Отв. ред. В.И. Кейлис-Борок. — М.: Наука, 1991. — 96 с.

Соболев Г.А. Основы прогноза землетрясений. — М.: Наука, 1993. — 314 с.

Федотов С.А., Багдасарова А.М., Кузин И.П., Тараканов Р.З. Землетрясения и глубинное строение юга Курильской островной дуги. — М.: Наука, 1969. — 212 с.

Inouye W. On the seismicity in the epicentral region and its neighborhood before the Niigata earthquake // Kenshin Jiho. — 1965. — V. 29. — P. 31–36.

Mogi K. Some features of recent seismic activity in and near Japan (1) // Bulletin of the Earthquake Research

Institute, University of Tokyo. – 1968. – V. 46. – P. 1225–1236.
Nesterenko M.Y., Nesterenko Y.M. Hydro-geodynamic and geodynamic processes in the platform territo-

ries of hydrocarbon production // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. doi: 10.1088/1755-1315/321/1/012004

Сведения об авторах

Нестеренко Максим Юрьевич, д-р геол.-мин. наук, зав. отделом геоэкологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Оренбургского федерального исследовательского центра Уральского отделения Российской академии наук (ОФИЦ УрО РАН), г. Оренбург, Россия. E-mail: n_mu@mail.ru

Капустина Оксана Александровна, канд. техн. наук, ст. науч. сотр. Отдела геоэкологии ОФИЦ УрО РАН, г. Оренбург, Россия. E-mail: onical@yandex.ru

Никифоров Сергей Эдуардович, канд. техн. наук, доцент Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС»» (НИТУ «МИСИС»), г. Москва, Россия. E-mail: nikiforovs@inbox.ru

Influence of development of raw hydrocarbon deposits on the geodynamic state and seismic regime of the Earth's crust in the Southern Urals

© 2021 M.Yu. Nesterenko¹, O.A. Kapustina¹, S.E. Nikiforov²

¹OFRC UB RAS, Orenburg, Russia; ²MISiS, Moscow, Russia

Received November 2, 2020

Abstract The article presents the results of the analysis of the impact of field development on the geodynamic state and seismic activity of the earth's crust of the Southern Urals, were compared in field development, anthropogenic changes in the bowels of district fields with the level of seismic activity, correlation between indicators of development of deposits and the parameters of the seismic activity of the earth's crust and the statistical analysis of the seismic regime of the area deposits of hydrocarbon raw materials. Correlation analysis of field development indicators and seismic activity parameters revealed an almost linear relationship ($r > 0.9$) between reservoir pressure and the number of events (including low-energy pulse events) and a close relationship between the average debit and the number of events. A model of the seismic activity of hydrocarbon deposits in the Southern Urals is constructed in the form of a set of graphs of the frequency of seismic events and changes in their angle of inclination. The constructed model indicates a change in the nature of seismic activity in the subsurface of the field area, which consists in a decrease in the energy of events and an increase in their number. The cyclical nature of seismic activity on the territory of the Orenburg oil and gas condensate field (OOGCF) is revealed. Currently, there is an accumulation of stress associated with the continued drop in reservoir pressure during the field operation and natural tectonic processes against the background of a decrease in the rate of hydrocarbon production. Reducing production volumes at OOGCF does not reduce the man-made load on the Earth's crust, but reduces the rate of stress accumulation. This leads to a decrease in the energy of seismic events and an increase in their number (taking into account the pulses).

Keywords Geological environment, seismic activity, hydro geodynamic processes, oil and gas fields, Southern Urals.

For citation Nesterenko, M.Yu., Kapustina, O.A., & Nikiforov, S.E. (2021). [Influence of development of raw hydrocarbon deposits on the geodynamic state and seismic regime of the Earth's crust in the Southern Urals]. *Rossiiskii seismologicheskii zhurnal* [Russian Journal of Seismology], 3(3), 75–83. (In Russ.). DOI: <https://doi.org/10.35540/2686-7907.2021.3.05>

References

- Adushkin, V.V., Rodionov, V.N., Turuntayev, S.B., & Yudin, A.Ye. (2000). [Seismicity of hydrocarbon deposits]. *Neftegazovoye obozreniye* [Oil and Gas Review], 1, 7. Available at: <http://www.petrobak.com/files/88mh72lvvsfhi6lf.pdf> (In Russ.).
- Fedotov, S.A., Bagdasarova, A.M., Kuzin, I.P., & Tarakanov, R.Z. (1969). *Zemletriaseniia i glubinnoe stroenie iuga Kuril'skoi ostrovnoidugi* [Earthquakes and deep structure of the South Kuril Island arc]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 212 p. (In Russ.).
- Gabsatarova, I.P., Golubeva, I.V., Dyagilev, R.A., Karpinskiy, V.V., Konechnaya, Ya.V., Mehrushev, D.Yu., Nadezhka, L.I., Nesterenko, M.Yu., Noskova, N.N., Petrov, S.I., Pivovarov, S.P., Poigina, S.G., & Sanina, I.A. (2019). [East-European Platform, Urals Mountains and Western Siberia]. In *Zemletriaseniia Rossii v 2017 godu* [Earthquakes in Russia in 2017] (pp. 24-29). Obninsk, Russia: GS RAS Publ. (In Russ.).
- Inouye, W. (1965). On the seismicity in the epicentral region and its neighborhood before the Niigata earthquake. *Kenshin Jiho*, 29, 31-36.
- Mogi, K. (1968). Some features of recent seismic activity in and near Japan (1). *Bulletin of the Earthquake Research Institute, University of Tokyo*, 46, 1225-1236.
- Nesterenko, M.Y., & Nesterenko, Y.M. (2019). Hydro-geodynamic and geodynamic processes in the platform territories of hydrocarbon production. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. doi: 10.1088/1755-1315/321/1/012004
- Nesterenko, M.Yu., Nesterenko, Yu.M., & Sokolov, A.G. (2015). *Geodinamicheskie protsessy v razrabatyvaemykh mestorozhdeniyakh uglevodorodov (na primere Iuzhnogo Predural'ia)* [Geodynamic processes in the developed hydrocarbon deposits (on the example of the Southern Urals)]. Ekaterinburg, Russia: UB RAS Publ., 186 p. (In Russ.).
- Nesterenko, Yu.M., & Nesterenko, M.Yu. (2017). [Underground waters of the Southern Urals and their hydro-dynamics in the areas of hydrocarbon production]. *Litosfera* [Lithosphere], 2, 125-138. (In Russ.).
- Nesterenko, Yu.M., Sokolov, A.G., & Nesterenko, M.Yu. (2014). [Features of tectonics and geodynamics of deposits of the kungurian stage in the hydrocarbon deposits of the Southern Urals]. *Litosfera* [Lithosphere], 3, 132-139. (In Russ.).
- Sadovskiy, M.A., & Pisarenko, V.F. (1991). *Seysmicheskiy protsess v blokovoy srede* [Seismic process in the block environment]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 96 p. (In Russ.).
- Sobolev, G.A. (1993). *Osnovy prognoza zemletriasenii* [Fundamentals of earthquake forecasting]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 314 p. (In Russ.).
- Vinogradov, S.D. (1957). [Acoustic observations in the mines of the Kizelovsky coal basin]. *Izvestiia AN SSSR. Ser. Geofiz.* [Izvestiya USSR Academy of Sciences], 6, 744-755. (In Russ.).
- Vinogradov, S.D. (1963). [Acoustic monitoring of processes of destruction of rocks in the mine "Anna", Czechoslovakia]. *Izvestiia AN SSSR. Ser. Geofiz.* [Izvestiya USSR Academy of Sciences], 4, 501-512. (In Russ.).
- Vinogradov, S.D. (1980). [Changes in the seismic regime during the preparation of destruction]. In *Modelirovanie predvestnikov zemletriasenii* [Modeling earthquake precursors] (pp. 169-178). Moscow, Russia: Nauka Publ. (In Russ.).
- Vinogradov, S.D., Mirzoev, K.M., & Salomov, N.G. (1975). *Issledovanie seismicheskogo rezhima pri razrushenii obraztsov* [Investigation of the seismic regime during the destruction of samples]. Dushanbe, Tajikistan: Donish Publ., 118 p. (In Russ.).
- Zavyalov, A.D. (2006). *Srednesrochnnyi prognoz zemletriasenii: osnovy, metodika, realizatsiia* [Medium-term forecast of earthquakes: bases, technique and realization]. Moscow, Russia: Nauka Publ., 254 p. (In Russ.).

Information about authors

- Nesterenko Maksim Yur'evich**, Dr, Head of Geoecology of the Department of the Orenburg Federal Research Center of Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (OFRC UB RAS), Orenburg, Russia. E-mail: n_mu@mail.ru
- Kapustina Oksana Aleksandrovna**, PhD, Senior Researcher of the Department of Geoecology of the OFRC UB RAS, Orenburg, Russia. E-mail: onical@yandex.ru
- Nikiforov Sergey Eduardovich**, PhD, Associate Professor of the Department of Geology and Surveying at the National University of Science and Technology "MISiS" (MISiS), Moscow, Russia. E-mail: nikiforovs@inbox.ru