

СТАТЬИ

УДК 551.736:519.246
DOI 10.17513/use.38500



CC BY 4.0

**К ВОПРОСУ ОБ ИССЛЕДОВАНИИ СТРОЕНИЯ
ОСАДОЧНОГО РАЗРЕЗА МЕТОДОМ ЦЕПЕЙ МАРКОВА
НА ПРИМЕРЕ НИЖНЕКАЗАНСКИХ ОТЛОЖЕНИЙ
ЮГО-ВОСТОКА РЕСПУБЛИКИ ТАТАРСТАН**

Нургалиева Н. Г., Фахрутдинов Э. И. ORCID ID 0000-0001-7667-0631

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
«Казанский (Приволжский) федеральный университет», Казань, Российская Федерация,
e-mail: MKS-1989eduard@yandex.ru*

Цель исследования заключается в изучении математических закономерностей строения пермских отложений с применением метода цепей Маркова на примере нижнеказанских отложений юго-востока Русской плиты. Актуальность исследования обусловлена необходимостью разработки новых подходов к анализу геологических разрезов, позволяющих более глубоко понимать процессы формирования осадочных толщ. Объектом исследования являются нижнеказанские отложения междуречья рек Лесная Шешма и Инэш, представленные терригенно-карбонатным разрезом общей толщиной более 60 метров. Методы исследования включают математическое моделирование с использованием цепей Маркова, петрофизические исследования состава пород, статистический анализ данных. Проведен анализ матрицы вероятностей переходов между типами пород по выборке из 150 наблюдений. Выявлены интервалы стабильного осадконакопления и резких изменений в чередовании пород. Установлено циклическое строение разреза с выделением пяти полных осадочных циклов. По числу циклов камышлинский горизонт характеризуется наибольшей полнотой разреза по сравнению с соседними горизонтами. Практическая значимость работы заключается в развитии цифровых подходов к анализу пермских отложений, позволяющих более точно интерпретировать строение и особенности их формирования и расширяющих понимание палеогеографических условий.

Ключевые слова: пермские отложения, нижнеказанские отложения, метод цепей Маркова, терригенно-карбонатные разрезы, осадочные циклы

**ON THE STUDY OF THE SEDIMENTARY SECTION STRUCTURE
USING THE MARKOV CHAINS METHOD: A CASE STUDY
OF THE LOWER KAZANIAN DEPOSITS IN THE SOUTHEAST
OF THE REPUBLIC OF TATARSTAN**

Nourgalieva N. G., Fakhrutdinov E. I. ORCID ID 0000-0001-7667-0631

*Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education
«Kazan (Volga Region) Federal University», Kazan, Russian Federation,
e-mail: MKS-1989eduard@yandex.ru*

The purpose of the study is to investigate the mathematical patterns of Permian deposits structure using the Markov chains method on the example of Lower Kazanian deposits in the southeast of the Russian Plate. The research is focused on developing a new approach to understanding the mathematical patterns of sedimentary strata formation and their cyclic structure. The object of research is the Lower Kazanian deposits of the interfluvium of the Lesnaya Sheshma and Inesh rivers, represented by a terrigenous-carbonate section with a total thickness of about sixty meters. The research methods include mathematical modelling using Markov chains, petrophysical studies of rock composition, and statistical data analysis. The analysis of one hundred fifty levels throughout the entire section was conducted. Intervals of stable sedimentation and abrupt changes in rock succession were identified. A cyclic structure of the section was established, with the identification of five complete sedimentary cycles. In terms of the number of cycles, the Kamyshlinsky Horizon is characterized by the highest section completeness compared to adjacent horizons. The practical significance of the work lies in advancing a digital approaches to the analysis of the Permian sedimentary successions, enabling more accurate interpretation of their structure and formation features, and broaden the understanding of paleogeographic conditions.

Keywords: Permian system, Lower Kazanian succession, Markov chain method, terrigenous-carbonate sections, sedimentary cycles

Введение

Пермские отложения, распространенные на востоке Русской плиты, известны своим пестрым составом и сложным строением, обусловленным изменчивостью обстановок осадконакопления на протяжении истории формирования этой уникальной

осадочной толщи. Не исключением являются и входящие в состав пермской системы нижнеказанские отложения в Республике Татарстан (РТ), образовавшиеся во время движения так называемого Казанского палеоомора. На обширной территории существовал спектр обстановок осадконакопления,

связанный с этим палеоморем, в котором доминировали морские мелководные и лагунные обстановки. Сложная циклическая история осадконакопления в казанский век, и в частности в раннеказанское время, привела к сложному строению осадочных разрезов, характеризующихся специфическим чередованием пачек и слоев, составляющих терригенно-карбонатные разрезы. Изучение закономерностей строения таких разрезов всегда выступает актуальной задачей со времени открытия пермской системы Р. И. Мурчисоном (1841) и изучения седиментационных пермских циклов Н. А. Головкинским [1; 2]. Одним из направлений в изучении осадочных систем, в том числе пермских, является математическое и статистическое описание и моделирование строения осадочных разрезов. В этом плане в отношении казанских отложений востока Русской плиты важно отметить труды Ю. В. Сементовского, предложившего литомодули и работы Н. Г. Нурғалиевой, Э. В. Утемова, В. Е. Косарева, Д. К. Нурғалиева и др. [1] по выявлению фрактальной природы и циклического строения стратиграфической записи перми.

Цель настоящего исследования состоит в развитии представлений о математических закономерностях строения пермских отложений на основе применения метода цепей Маркова.

Материалы и методы исследования

Цепи Маркова – это математические модели, описывающие процессы, в которых вероятность перехода в следующее состояние зависит только от текущего состояния [3]. В геологии такие процессы, например, подробно рассмотрены в [4-6].

В современной геологии цепи Маркова активно используются для моделирования разрезов скважин и оценки вероятности переходов между различными фациями [7-9].

Марковский процесс характеризуется тем, что нахождение системы в определённом состоянии в данный момент времени можно определить по информации о предшествующих состояниях. Для описания поведения марковских цепей строятся матрицы вероятностей перехода [10-12].

В настоящей работе применяется код, составленный на Python, выполняющий подготовку данных, подсчет переходов между состояниями (типами горных пород (песчаник, алевролит, глина, мергель, известняк, доломит)), построение матрицы переходов, проверку последовательности на наличие

марковского свойства, анализ полученной матрицы.

Оценка достоверности матрицы переходов проводилась путем использования теста отношения правдоподобия, теста χ^2 , критерия АИС (критерия Акаике) согласно [9].

Объектом исследований выбраны нижнеказанские отложения, опробованные в междуречье р. Лесная Шешма и р. Инэш на юго-востоке Русской плиты. Разрез представлен отложениями байтуганского, камышлинского и красноярского горизонтов общей толщиной ~61 м [13]. По составу это терригенно-карбонатный разрез, в котором отмечается сложное переслаивание смешанных разностей алевролитов, глин, мергелей и карбонатных пород.

Непосредственным материалом для исследований послужила совокупность данных по типам горных пород, установленным на основе классификации [14, с. 34–35]. В работе [14] описана методика классификации и номенклатуры карбонатных и смешанных пород. Предлагается упрощенный подход к определению состава пород. Вместо трудоемкого нормативного пересчета рекомендуется вычислять отношение содержаний MgO/CaO по данным фазового «карбонатного» анализа, что позволяет точно определить процент доломита в карбонатном веществе. Используются градации С. Г. Вишнякова (0–5–25–50–75–95–100%), а также методики определения содержания силикатного компонента в смешанных породах. Особое внимание уделяется проблеме терминологии при наименовании смешанных пород, в частности мергелей. Предлагается расширенное традиционное понимание термина «мергель», включая в него не только глинисто-карбонатные, но и другие разновидности смешанных пород. Методика включает использование классификационного треугольника Вишнякова для графического определения состава пород и позволяет корректно именовать различные типы карбонатных и смешанных пород, включая конкреоиды. В указанной классификации выделено 30 классов осадочных пород по соотношению содержания кальцита, доломита и нерастворимого остатка [14, с. 34-35]. Эти классы соотнесены с группами доломитов, известняков, мергелей и терригенных разностей (глин, алевролитов, песчаников). Эти группы использованы как состояния для анализа методом марковских цепей.

Измерение содержаний кальцита, доломита и нерастворимого остатка в породах

проводилось с помощью кадометра в петрофизической лаборатории КФУ согласно [15]. Методика исследования горных пород с помощью прибора «Кадометр» основана на количественном измерении содержания карбонатных минералов (кальцита и доломита) путем фиксации объема углекислого газа, выделяющегося при реакции образца с 12%-ной соляной кислотой, при этом принцип работы базируется на прямой зависимости между массой карбонатов и объемом CO_2 , а также на различной скорости реагирования кальцита и доломита с реагентом, что позволяет их дифференцировать. Техническая реализация осуществляется с помощью автоматизированного комплекса, включающего реакционную камеру с системой дозирования кислоты, высокоточные весы для измерения массы вытесненной жидкости, специализированное программное обеспечение для обработки данных и систему контроля параметров эксперимента. Процесс анализа состоит из этапов подготовки пробы (измельчение до размера 0.07-0.02 мм и взвешивание навески 0.5-5 г), проведения самого анализа (добавление дистиллированной воды, дозирование кислоты и регистрация выделяющегося газа) и последующей компьютерной обработки результатов, методика характеризуется высокой точностью измерений (погрешность $\pm 5\%$), широким диапазоном определяемых содержаний (0–100%), возможностью работы с малыми пробами и раздельным определением обоих типов карбонатов, однако требует строгого соблюдения условий подготовки проб, использования качественных реактивов, регулярного технического обслуживания и калибровки оборудования, а также соблюдения рабочих параметров (температура $+20...+30\text{ }^\circ\text{C}$, влажность до 90%, атмосферное давление 98-108 кПа).

Результаты исследований и их обсуждение

Данные, полученные по соотношению карбонатности (содержание карбонатных минералов – кальцита, доломита) и нерастворимого остатка, были использованы для выявления типов горных пород по 150 уровням по всему разрезу нижнеказанских отложений [13] согласно [14, с. 34-35].

Установлено наличие пород, принадлежащих большей части классов согласно [14, с. 34-35]. Эти классы были объединены с учетом карбонатности и размера зерен

обломочной части (нерастворимого остатка) в состоянии: 1 – песчаник, 2 – алевролит, 3 – глина (классы 25-29 по [14, с. 34-35]), 4 – мергель (классы 13-24 по [14, с. 34-35]), 5 – известняк (классы 8, 9 по [14, с. 34-35]), 6 – доломит (классы 4, 10-12 по [14, с. 34-35]).

Главным результатом применения программного кода по анализу методом цепей Маркова к выборке из 150 наблюдений явилась матрица вероятностей переходов между (состояниями) в виде цветовой карты (рис. 1).

Матрица переходов представляет собой квадратную матрицу, где строки соответствуют текущему состоянию (типу породы); столбцы – следующему состоянию (типу породы). Элементами матрицы являются вероятности перехода от одного типа породы к другому.

В нашем случае используется шесть состояний (типов пород), поэтому матрица имеет размер 6×6 .

Оценка достоверности полученной матрицы согласно [9] показала, что статистика отношения правдоподобия имеет значение – 417.96, меньшее, чем критическое значение 179.58; значение АИС составляет 88.43, а значение $\chi^2 = 3.55$ меньше критического значения 37.65. Следовательно, полученная матрица переходов по указанным критериям характеризуется марковским свойством и достоверна.

Согласно матрице переходов (рис. 1) песчаник (состояние 1) с вероятностью 0.29 переходит в мергель (4) или доломит (6).

Алевролит (2) характеризуется высокой вероятностью остаться алевролитом (0.46); часто переходит в глину (3) и мергель (4).

Глина (3) остается глиной с вероятностью 0.41; часто переходит в мергель (4) (вероятность 0.37).

Мергель (4) переходит в мергель с вероятностью 0.48; также переходит в известняк (5, вероятность 0.16) и доломит (6, вероятность 0.12).

Известняк (5) переходит в известняк или в мергель с вероятностью 0.25.

Доломит (6) переходит в мергель с вероятностью 0.5 и в доломит с вероятностью 0.39.

Чередование пород (состояний) указывает на периодические изменения условий осадконакопления (глубина моря, удаленность от источника сноса, климат и т. д.).

Высокие вероятности оставаться в том же типе породы (особенно для мергеля, алевролита и доломита) указывают на длительные периоды стабильных условий.

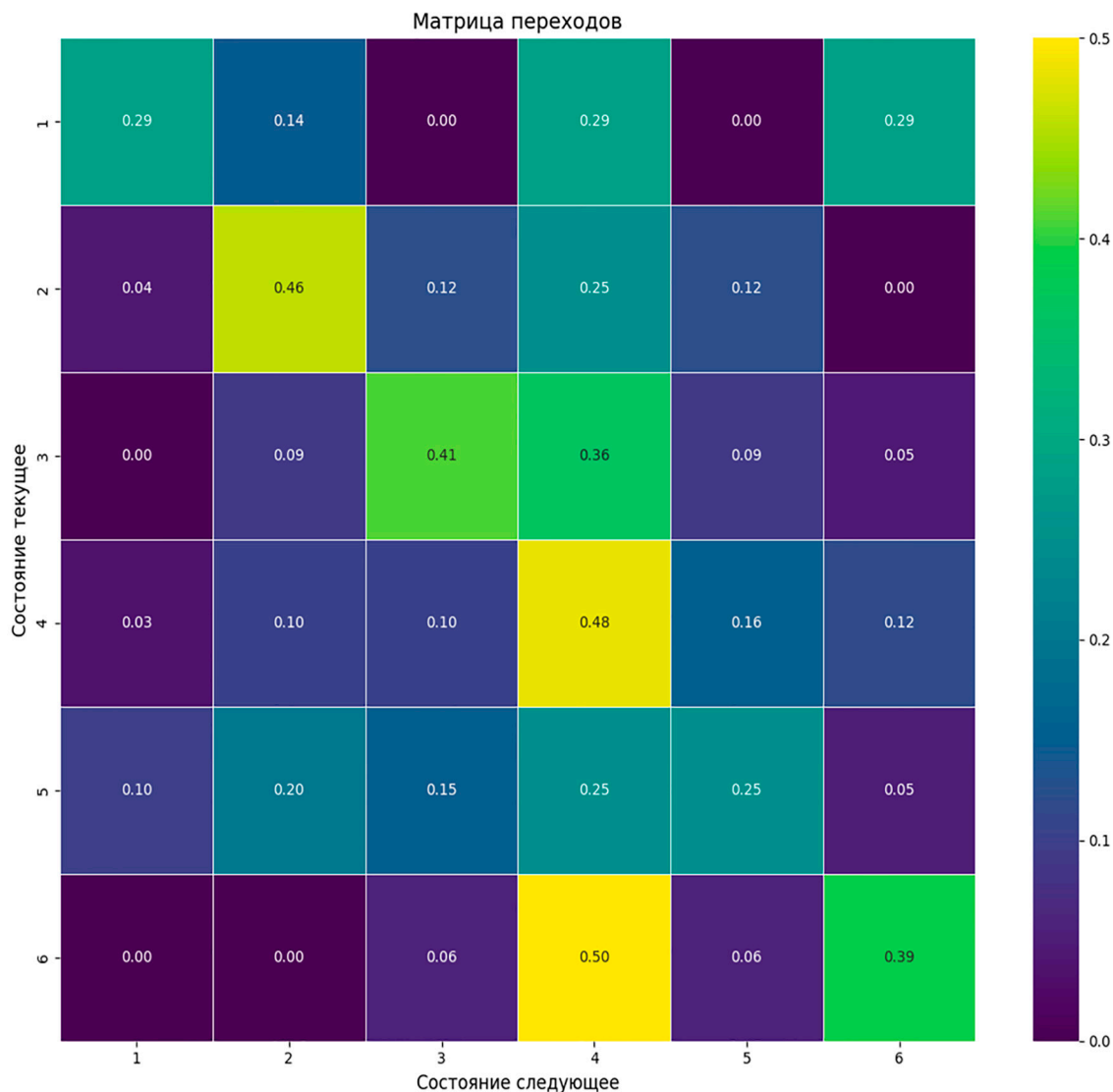


Рис. 1. Цветовая карта матрицы переходов. Каждая ячейка матрицы показывает вероятность перехода из состояния, указанного по вертикальной оси, в состояние, указанное по горизонтальной оси. Состояния: 1 – песчаник, 2 – алевролит, 3 – глина, 4 – мергель, 5 – известняк, 6 – доломит. Значения в ячейках представлены в виде чисел (вероятность перехода)/цветов (интенсивность перехода)

Источник: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Переходы между разными типами пород (например, песчаник → мергель или глина → мергель) свидетельствуют о существенных изменениях среды осадконакопления.

Высокая вероятность переходов между мергелем, известняком и доломитом говорит о значительном вкладе карбонатного осадконакопления в разрезе.

Переходы к песчанику и алевролиту указывают на эпизоды усиления сноса обломочного материала с суши.

К интервалам стабильных условий осадконакопления (диагональные элементы

матрицы >0,4 (рис. 1)) относятся, например, интервалы 29.09-33.39 м (серия мергелей с редкими прослоями других пород); 28.15–28.39 м (серия доломитов); 17.03–18.55 м (чередование мергеля и известняка, с преобладанием мергеля); 7.35–7.44 м (серия доломитов) (рис. 2).

Указанные интервалы могут быть охарактеризованы как длительные периоды стабильного морского режима с преимущественно карбонатным осадконакоплением (мергель, доломит) или терригенным осадконакоплением (алевролит).

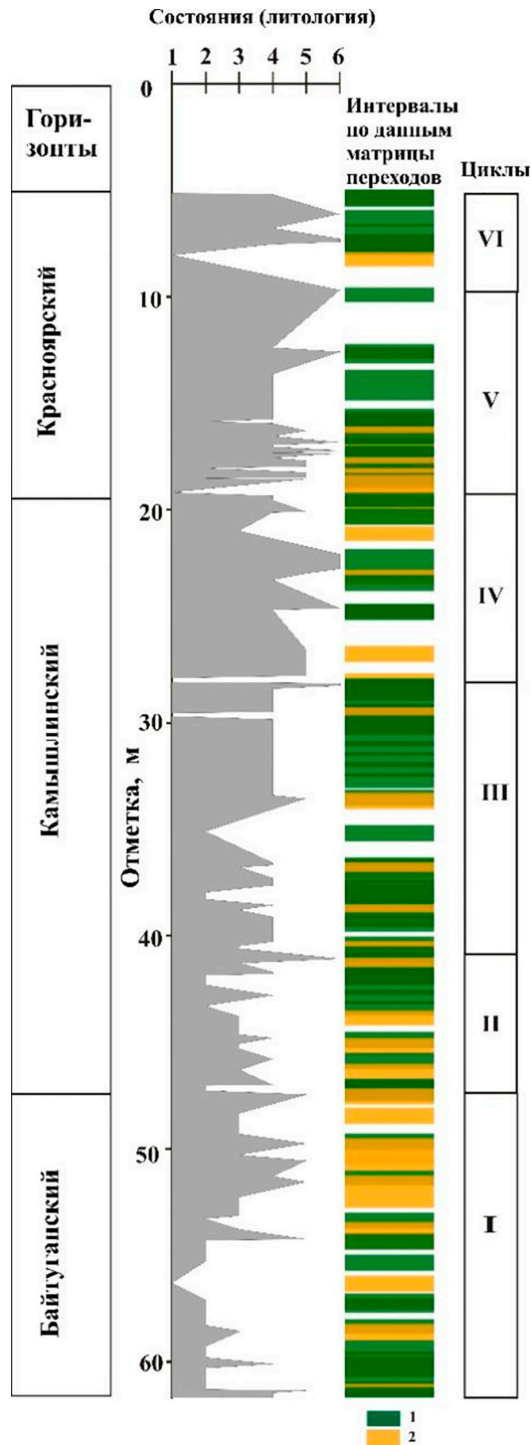


Рис. 2. Строение разреза нижнеказанских отложений. Состояния (литология): 1 – песчаник, 2 – алевролит, 3 – глина, 4 – мергель, 5 – известняк, 6 – доломит
Условные обозначения: 1 – интервалы стабильных условий осадконакопления (диагональные элементы матрицы $> 0,4$ (рис. 1)); 2 – интервалы резких изменений в условиях осадконакопления (элементы матрицы вне диагонали с высокими значениями (рис. 1))
Источник: составлено авторами на основе полученных данных в ходе исследования

Интервалы резких изменений условий осадконакопления характеризуются частыми переходами между разными типами пород (высокие значения вне диагонали матрицы (рис. 1)), например: переход на отметке 8,05 м (песчаник (1) → мергель (4) ($P(1 \rightarrow 4) = 0.29$)); переход на отметке 28.49 м (мергель (4) → песчаник (1), затем снова мергель); переход на отметке 20.99 м (глина (3) → мергель (4) ($P(3 \rightarrow 4) = 0.36$)); серия переходов на глубинах 40.29–41.85 м (чередование глины, мергеля, алевролита); переходы на отметках 16.55 м, 17.33 м, 35.09 м (известняк → мергель ($P(5 \rightarrow 4) = 0.25$)), рис. 2).

Интервалы усиления сноса терригенного материала сопоставляются с эпизодами регрессии (обмеления), когда береговая линия приближается к области осадконакопления (тектонические поднятия суши, активизация эрозии; климатические изменения (увеличение атмосферных осадков, усиление стока); формирование дельтовых или прибрежно-морских фаций). Интервалы усиления сноса обломочного материала с суши характеризуются переходами к песчанику (1) и алевролиту (2), например: появление песчаника (1) (отметка 8.05 м); отметки 29.54 м и 29.69 м (мергель (4) → песчаник (1)); появление алевролита (2) (отметка 15.85 м: мергель (4) → алевролит (2)); отметки 42.79 м, 43.29 м (мергель (4) → алевролит (2)); отметки 47.03 м – 47.29 м (серия алевролитов).

Распределение состояний и переходов задает циклический рисунок строения разреза: выделяются регрессивно-трансгрессивные циклы (пять полных и один неполный) категории D по классификации Миалла [1; 2]. Их границы контролируются характерной сменой литотипов и зон условий осадконакопления по данным матрицы переходов: регрессивная фаза отмечается переходами, связанными с усилением влияния суши (глина/карбонат → алевролит → песчаник), а трансгрессивная фаза характеризуется переходами, связанными с увеличением доли тонкозернистого материала и карбонатов (песчаник → алевролит → глина/карбонат). Один цикл приходится на байтуганское время, три цикла – на камышлинское время и один полный+один неполный циклы – на красноярское время.

Таким образом, камышлинский горизонт характеризуется наибольшей полнотой и литофациальным разнообразием циклической летописи по сравнению с байтуганским и красноярским горизонтами, что согласуется с данными [13].

Проведенный анализ строения нижнеказанских отложений методом цепей Маркова показал информативность матрицы переходов для понимания закономерностей формирования разреза, его неоднородности и цикличности.

Заключение

Проведенное исследование демонстрирует перспективность применения метода цепей Маркова для анализа строения нижнеказанских отложений на основе распределения событий осадконакопления, распознаваемых в матрице переходов. Подобный подход может быть использован для изучения других подразделений пермской системы, строение которой характеризуется сложным фаціальным строением, обусловленным колебаниями уровня моря.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на сочетание метода цепей Маркова с традиционными методами геологического анализа и на совершенствование алгоритмов сбора и обработки данных и построения матриц переходов с высоким уровнем достоверности.

Полученные результаты могут служить предварительной основой для создания новых методических рекомендаций по изучению осадочных разрезов, что имеет важное значение для развития циклического анализа в связи с тем, что математическая модель, построенная на основе марковских процессов, позволяет оценивать вероятность сценариев формирования осадочных толщ.

Список литературы

1. Нургалиева Н. Пермские осадочные разрезы востока Русской плиты. Цикличность и фрактальные образы. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2010. 210 с. ISBN: 9783843301008.
2. Фахрутдинов Э. И., Нургалиева Н. Г. Литолого-фаціальные особенности пачки лингуловых глин на юго-востоке Республики Татарстан по данным гранулометрического состава и карбонатности // Успехи современного естествознания. 2025. № 8. С. 42-55. URL: <https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=38420> (дата обращения: 13.09.2025). DOI: 10.17513/use.38420.

3. Вистелиус А. Б. Основы математической геологии. Ленинград: Недра, 1980. 389 с. URL: <https://lithology.ru/system/files/books/vistelius.pdf> (дата обращения: 13.02.2026).

4. Wang Z. Z., Huang X., Liang Y. R. Oil-gas reservoir lithofacies stochastic Modeling based on one-to three-dimensional Markov chains // J. Cent. South Univ. 2018. Vol. 25 (6). P. 1399–1408. DOI: 10.1007/s11771-018-3835-3.

5. Cao W., Zhou A., Shen S. L. An analytical method for estimating horizontal Transition probability matrix of coupled Markov chain for simulating geological uncertainty // Comput. Geotech. 2021. Vol. 129. P. 103871. DOI: 10.1016/j.compgeo.2020.103871.

6. Yang H. Q., Chu J., Qi X., Wu S., Chiam K. Stochastic simulation of geological cross-sections from boreholes: a random field approach with Markov Chain Monte Carlo method // Eng. Geol. 2023. Vol. 327. P. 107356. DOI: 10.1016/j.enggeo.2023.107356.

7. Wang F., Li H., Li G., You Z. J., Chen E. J. Characterization of geological Uncertainties from limited boreholes using copula-based coupled Markov chains for underground construction // Undergr. Space. 2024. Vol. 16. P. 94–105. DOI: 10.1016/j.undsp.2023.09.009.

8. Zhang J. Z., Liu Z. Q., Zhang D. M., Huang H. W., Phoon K. K., Xue Y. D. Improved coupled Markov chain method for simulating geological uncertainty // Eng. Geol. 2022. Vol. 298. P. 106539. DOI: 10.1016/j.enggeo.2022.106539.

9. Jiang Q.-H., Zhang J.-Z., Zhang D.-M., Huang H.-W. Simulation of geological uncertainty based on improved three-dimensional coupled Markov chain model // Engineering Geology. 2024. Vol. 340. P. 107647. DOI: 10.1016/j.enggeo.2024.107647.

10. Qi X. H., Li D. Q., Phoon K. K., Cao Z. J., Tang X. S. Simulation of geologic uncertainty using coupled Markov chain // Eng. Geol. 2016. Vol. 207. P. 129–140. DOI: 10.1016/j.enggeo.2016.04.017.

11. Deng Z. P., Pan M., Niu J. T., Jiang S. H. Full probability design of soils lope considering both stratigraphic uncertainty and spatial variability of soil properties // B. Eng. Geol. Environ. 2022. Vol. 81 (5). P. 1–13. DOI: 10.1007/s10064-022-02702-2.

12. Gong W. P., Tang H. M., Wang H., Wang X. R., Juang C. H. Probabilistic analysis and design of stabilizing piles in slope considering stratigraphic uncertainty // Eng. Geol. 2019. Vol. 259. P. 105–162. DOI: 10.1016/j.enggeo.2019.105162.

13. Nurgalieva N. G., Silantiev V. V., Fakhрутдинов E. I., Gareev B. I., Batalin G. A. The Lower Kazanian rocks as shallow marine facies (south-eastern Tatarstan) on geochemistry data // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. Vol. 11. № 23. P. 13462–13471. URL: http://www.arpnjournals.org/jeas/research_papers/rp_2016/jeas_1216_5413.pdf (дата обращения: 26.02.2026).

14. Юдович Я. А., Кетрис М. П. Как назвать карбонатсодержащую породу? (Из опыта практической работы) // Вестник Института геологии Коми НЦ УрО РАН. 2016. № 3. С. 33-36. DOI: 10.19110/2221-1381-2016-3-33-36.

15. Прибор для определения карбонатности горных пород «Кадометр»: Паспорт. Руководство по эксплуатации. ООО «ЭкогеосПром». Тверь, 2022. 17 с. ТУ–ЛЕАН. 032.99103030.2013.

Конфликт интересов: Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of interest: The authors declare that there is no conflict of interest.

Финансирование: Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования.

Financing: The research was performed without external funding.