

Вероятностный прогноз давления пескопроявления по результатам одномерного геомеханического моделирования

*Е.В. Новикова, А.Г. Собаев, И.А. Воронов
Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН*

В работе представлено исследование влияния неопределенности исходных данных о геомеханических и прочностных свойствах породы, а также горизонтальных пластовых напряжениях на результаты численных оценок депрессии начала пескопроявления.

Для решения задачи строилась модель горного массива в околоскважинном пространстве на основе данных геофизических исследований скважин и лабораторных исследований керна. Она представляла собой слоистую многофациальную линейно-упругую среду. При восстановлении профиля вертикального напряжения использовалась гипотеза о субвертикальности одной из главных осей тензора напряжений. При оценке профилей горизонтальных напряжений использовалась методика, основанная на реконструкции пространственного распределения напряжений в слоистой среде по данным точечных измерений, а именно данных гидроразрыва пласта.

Выполнялось варьирование неопределенности во входных данных упругих и прочностных свойств среды и горизонтальных пластовых напряжений. Указанные параметры изменялись случайным образом в рамках диапазона неопределенности, соответствующего фактическому разбросу свойств пород, относящихся к одной геомеханической фации. В рамках простейшей модели оценки давления начала пескопроявления это давление определялось для различных реализаций комбинаций исходных параметров методом Монте-Карло.

Использованный статистический подход позволял определить функцию плотности вероятности начала пескопроявления при заданной дисперсии определенного параметра. Отмечено, что прогноз критического значения давления наиболее чувствителен к величине максимального горизонтального напряжения.

Результаты применения описанного подхода сделали возможным корректный учет неопределенности исходных данных для построения геомеханических моделей. На примере задачи пескопроявления оценена реальная неоднозначность определения давления начала необратимого разрушения пород околоскважинной зоны из-за разработки месторождений углеводородов.

Ключевые слова: геомеханика, неопределенность, пескопроявление, метод Монте-Карло.

Для цитирования: Новикова Е.В., Собаев А.Г., Воронов И.А. (2026). Вероятностный прогноз давления пескопроявления по результатам одномерного геомеханического моделирования. Трудноизвлекаемые запасы, 1(2), с. 23-29.

Probabilistic forecast of sand pressure based on the results of one-dimensional geomechanical modeling

*E.V. Novikova, A.G. Sobaev, I.A. Voronov
Schmidt Institute of Physics of the Earth*

The paper presents a study on the influence of uncertainty in the initial data on geomechanical and strength properties of rock, as well as the horizontal reservoir stress, on the results of numerical estimation of the wellbore pressure required to prevent sand production. A model of the near-well rock mass is constructed from geophysical well logging data and laboratory core studies to solve this problem. The rock mass is considered a layered, multifacial, linear elastic medium. The hypothesis of subvertical principal stress was used for stress reconstruction. A method based on point measurements, specifically hydraulic fracturing data, is used to analyze horizontal stress profiles and reconstruct the stress distribution in a layered medium.

The uncertainty in the input data for the elastic and strength properties of the medium and the horizontal reservoir stresses is varied. These parameters are randomized within the range of uncertainty corresponding to the actual variation in the properties of rocks belonging to a specific geomechanical facies. The pressure allowing sand production is determined for various combinations of initial parameters using the Monte Carlo method within the framework of a simple model. The statistical approach makes it possible to determine the probability density function for sand production pressure with a given value of a certain parameter. Note that the prediction of the critical pressure is mostly sensitive to the magnitude of maximum horizontal stress.

The results of applying this approach allow us to accurately account for uncertainties in the initial data used to create geomechanical models. Using the example of the sand problem, we estimate the real ambiguity in determining the pressure at which irreversible rock destruction begins in the borehole surrounding rock masses during hydrocarbon deposit development.

Keywords: geomechanics; uncertainty; ingress of sand; Monte Carlo method.

Recommended citation: Novikova E.V., Sobaev A.G., Voronov I.A. (2026). Probabilistic forecast of sand pressure based on the results of one-dimensional geomechanical modeling. Hard-to-recover reserves, 1(2), pp. 23-29.

Введение

Пескопроявление или необратимое разрушение пород околоскважинной зоны при работе добывающих нефтяных или нефтегазовых скважин является одним из важных негативных факторов, снижающих эффективность разработки месторождений угле-

водородов (Zoback, 2007). В некоторых скважинах наблюдается необратимое разрушение пород околоскважинной зоны, приводящее к тому, что отдельные элементы твердой фазы оказываются в скважине и нарушают ее нормальный режим работы. К негативным последствиям относится не только снижение

темпов добычи, связанное с изменением скин-фактора, но и износ оборудования, необходимость использования специальных фильтров для предотвращения пескопроявления (Muhammad, Rasol, 2025). Практика показывает, что при работе на месторождениях с угрозой пескопроявления оптимально не бороться с последствиями этого эффекта, а выбирать условия работы скважины, не допускающие или снижающие вероятность начала выноса песка.

Существует несколько ключевых факторов, оказывающих влияние на условия начала пескопроявления. В первую очередь следует отметить единственный параметр, поддающийся внешнему изменению, – депрессию. Она или в большей степени непосредственно давление на скважине определяет, будет ли наблюдаться необратимое разрушение пород околоскважинной зоны при текущих условиях. Под текущими условиями понимаются в данном случае не только пластовое давление, но и механические свойства среды в прискважинном пространстве и ее напряженно-деформированное состояние. Согласно основным положениям механики разрушения, такой процесс начинает происходить, когда напряжения хотя бы в одной точке превышают локальные критические значения, связанные с критерием ее разрушения (Карев и др., 2018). В геомеханике месторождений разрушение среды описывается в терминах эффективных напряжений, являющихся разностью полных напряжений – напряжений, действующих в скелете, – и давления, насыщающего породу флюида. Для определения напряжений часто дополнительно используют упругие свойства среды, например модуль Юнга и коэффициент Пуассона (Ljunggren et al, 2003).

На сегодняшний день отмечаются две основных сложности с достоверным прогнозом давления на скважине, при котором в ее окрестности начинается активное разрушение. Первая сложность связана с неоднозначностью задания непосредственно критерия разрушения: разные породы могут быть описаны с помощью различных критериев, дающих результаты, не согласующиеся друг с другом (Rahmati et al, 2013). Вторая сложность связана с неоднозначностью определения условий, в которых находятся породы околоскважинной зоны (Andersen et al, 2022; Ray et al, 2024; Zheng et al, 2024). При расчете происходит подстановка в (даже правильно выбранный) критерий разрушения следующих параметров: прочностных свойств, давлений и напряжений. Напряжения, в свою очередь, рассчитываются с использованием профилей упругих свойств. И упруго-прочностные свойства, и напряжения определяются по геофизическим данным с существенными неоднозначностями, что ведет к накоплению погрешности и последующему снижению достоверности прогноза давления начала пескопроявления.

В качестве серьезного недостатка существующих моделей определения давления начала пескопроявления можно выделить их детерминистичность. Как правило, модели дают единое значение давления (или зависимости давления на скважине от давления в пласте), при котором на выбранном интервале глубин начинается вынос песка. Такой подход может быть использован для формаций, характеризующихся большими объемами геофизических исследований скважин и представительными коллекциями образцов керна, на которых выполнены петрофизические и геомеханические испытания. Однако в реальных условиях детерминистичные модели могут быть неприменимы не из-за того, что выбран «неправильный» критерий разрушения или не учтены внешние факторы, а из-за объективной неопределенности в исходных данных. Хотя в отдельных задачах геомеханики месторождений, в частности при расчете устойчивости ствола скважины, используются статистические оценки (Song, Chang, 2017). Построение таких оценок для давления начала пескопроявления пока находится на начальном этапе формирования. Данная работа посвящена развитию статистического подхода интерпретации результатов одномерного геомеханического моделирования для прогноза условий начала пескопроявления. Использование предложенного подхода на практике позволит корректным образом учитывать объективную неопределенность результатов геомеханического моделирования при принятии решений о выборе режима работы добывающих нефтяных и нефтегазовых скважин.

Материалы и методы

В основе прогноза давления выноса песка лежат результаты одномерного геомеханического моделирования. Существуют различные подходы к построению одномерных геомеханических моделей; в этом исследовании использован алгоритм, описанный в работе (Дубиня, Галыбин, 2018). В рамках данного алгоритма реконструкция профилей напряжений выполняется поэтапно. На первом этапе выполняется расчет полного вертикального напряжения σ_v как интеграла плотности вышележащих пород и давления, насыщающего породы флюида по известным методам. На втором этапе происходит выделение слоев пород, которые можно назвать геомеханическими фациями, внутри которых упругие модули меняются незначительно. Третий этап основан на детальном рассмотрении границ между слоями: в работе (Дубиня, Галыбин, 2018) показано, что по известным упругим модулям обоих слоев и двум горизонтальным напряжениям в одном из них единственным образом определяются горизонтальные напряжения в другом слое. Внутри слоя принята линейная зависимость между горизонтальными и вертикальным напряжениями, следующая из уравнений равновесия.

В результате задание двух независимых измерений пластовых напряжений позволяет реконструировать зависимости горизонтальных напряжений от глубины единственным образом (при известных профилях упругих модулей). На четвертом этапе решается задача оптимизации: ищется такая пара независимых значений горизонтальных напряжений (например, в настоящей работе были выбраны максимальное σ_H и минимальное σ_h горизонтальные напряжения в верхнем слое), при которой минимальна разница между расчетными значениями пластовых напряжений и их косвенными оценками по геофизическим данным – информации о вывалообразовании, результатах тестов на утечки и испытаний на керновом материале (Зиганшин и др., 2024).

Дополнение одномерной модели зависимостей упругих модулей и напряжений от глубины профилями прочностных свойств, а также давлением флюида в пласте позволяет рассчитать, при каком давлении на скважине на каждой рассматриваемой глубине может начаться разрушение пород околоскважинной зоны, сопровождаемое выносом песка. Ясно, что наличие единственного «истинного» профиля упруго-прочностных свойств и напряжений приводит к детерминистичному определению «истинного» давления начала пескопроявления.

Тем не менее, необходимо понимать, что и упруго-прочностные свойства, и горизонтальные напряжения восстанавливаются по геофизическим данным с широким диапазоном неопределенности.

В рамках данного исследования предлагается учесть эту неопределенность с помощью моделирования методом Монте-Карло. Для этого используется следующий алгоритм.

Построение слоистой модели начинается с выделения геомеханических фаций и осреднения профилей упругих модулей в каждой из них. Задача выделения фаций требует отдельного рассмотрения и выходит за рамки данной работы. Внутри каждого слоя, даже среди пород, отнесенных к одной и той же геомеханической фации, возможен существенный разброс значений модуля Юнга E и коэффициента Пуассона ν (или компонент тензора упругих модулей при рассмотрении анизотропных сред). Для учета этого разброса предлагается построить частотное распределение каждого параметра, входящего в геомеханическую модель, для каждого выделенного слоя. Частотное распределение может быть использовано для определения его моментов или квантилей и реконструкции функции плотности вероятности, которая может быть задана аналитически при выборе семейства распределений, достаточно гибкого для описания геофизических данных. В рамках данного исследования предлагается использовать распределения семейства Пирсона, аналитическая форма которых единственным образом определяется

из моментов, что достаточно эффективно применяется при геомеханическом моделировании (Дубиня и др., 2024). В рамках данного исследования распределения параметров, характеризующих упругие и прочностные свойства пород – модуль Юнга E , коэффициент Пуассона ν , угол внутреннего трения ϕ и прочность на одноосное сжатие UCS , – строились на основании данных ГИС (осредненных профилей данных параметров с некоторым шагом в метрах), а также результатов лабораторных тестов на керновом материале. Пример полученной таким образом функции плотности распределения для статического модуля Юнга fE приведен ниже.

Аналогичные функции распределения были получены в результате множественного решения задачи поиска оптимальной пары независимых минимального и максимального горизонтальных напряжений по реальным данным методом Монте-Карло. В рамках решения такой обратной задачи использовались реальные сглаженные профили параметров пород, полученные из данных ГИС. Пример функций плотности распределения минимального $f(\sigma_h)$ и максимального $f(\sigma_H)$ горизонтальных напряжений приведен ниже:

Рассматривался вклад неопределенности каждого параметра, характеризующего горную среду – модуль Юнга, коэффициента Пуассона, угла внутреннего трения и прочности на одноосное сжатие, а также величин горизонтальных напряжений – в неоднозначность решения задачи геомеханики. Для этого проводилось поочередное варьирование каждого из перечисленных параметров. То есть профиль исследуемого параметра X случайным образом выбирался из распределения, полученного ранее (рис. 1 или рис. 2), профили остальных параметров фиксировались. Величина разброса исследуемого параметра искусственно изменялась путем домножения дисперсии

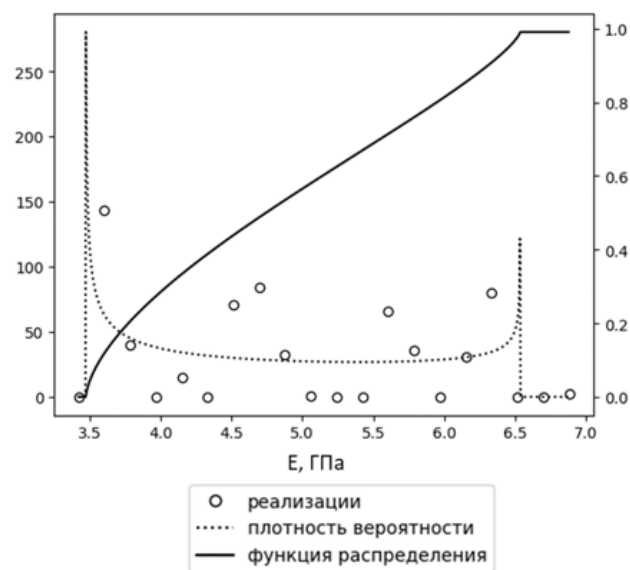


Рис. 1. Функция распределения и плотности вероятности для статического модуля Юнга

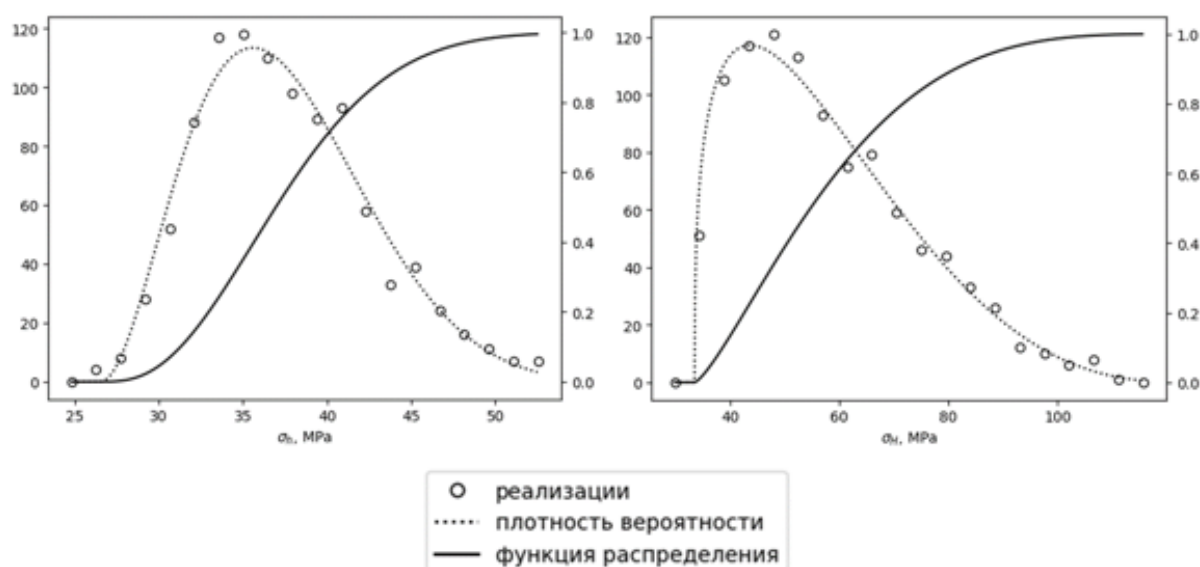


Рис. 2. Функции распределения и плотности вероятности для минимального (слева) и максимального (справа) горизонтальных напряжений

полученных ранее функций плотности распределения $f(X)$ на специально введенный коэффициент D_{dw} , который принимает следующие значения: 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.7, 0.8, 0.9, 1.0, и последующего прибавления некоторого значения, выбираемого таким образом, чтобы положение максимума плотности вероятности сохранялось. Для каждого значения коэффициента D_{dw} была сформирована тысяча вариативных профилей каждого исследуемого параметра.

Далее решалась задача оптимизации по поиску такой оптимальной пары независимых значений горизонтальных напряжений, при которой минимальная разница между расчетными значениями пластовых напряжений и их косвенными оценками по геофизическим данным – на основании давления закрытия трещин мини-ГРП на глубине их проведения. Для известного набора профилей прочностных свойств пород, а также вычисленных профилей вертикального, минимального и максимального горизонтальных напряжений давление начала пескопроявления определялось по простому выражению, применимому для случая вертикальной скважины в среде, разрушение которой подчиняется линейному закону Кулона-Мора:

$$P_{well} = \frac{1 - \sin \varphi}{2} (3\sigma_H - \sigma_h - UCS) + P_0,$$

где P_{well} – давление на скважине, которое при заданном пластовом давлении приводит к началу выноса песка; P_0 – поровое давление. Отметим, что и другие, более сложные модели расчета давления начала пескопроявления могут быть проанализированы с помощью аналогичного метода. При их использовании может увеличиться количество варьируемых параметров, однако методология исследования влияния неопределенности исходных дан-

ных на точность прогноза не изменится.

При использовании интегрального анализа интерес в большей степени представляет не распределение давлений по слоям, а минимальная депрессия, при которой вынос песка начнется на хотя бы одной глубине в рассматриваемом интервале. Из-за этого весь рассматриваемый интервал глубин характеризуется для каждой реализации одним значением давления, соответствующим минимальной депрессии по всем слоям. Выполнение множественного моделирования методом Монте-Карло позволяет определить частотное распределение уже давления начала выноса песка. В результате повторного анализа полученного распределения рассчитывается функция плотности вероятности, показывающая, в какой доли реализаций Монте-Карло при каждом давлении на скважине начинался вынос песка.

Такая функция плотности вероятности, выраженная аналитически или через квантили для рассматриваемого интервала глубин, может быть далее использована для объективного учета неоднозначности построения геомеханической модели при определении оптимального режима работы скважины, не допускающего вынос песка, или допускающего его при заданном уровне допустимой вероятности.

Результаты и обсуждение

Описанный алгоритм был применен для построения функции плотности вероятности для давления начала выноса песка на интервале глубин 2700–3000 м для условий, отражающих реальные условия залегания углеводородов на одном из месторождений Российской Федерации. Было подтверждено, что полученное распределение этого давления по множеству реализаций Монте-Карло также может быть описано с помощью распределений из семейства Пирсона. Помимо самой функции распределения, характеризующей весь интервал, были опреде-

лены значения давления, при которых в каждом слое вынос песка начинается с вероятностью 25, 50 и 75% (рис. 3). Полученные значения в целом согласованы с условиями пескопроявления на аналогичных объектах на качественном уровне.

В качестве отдельной задачи была рассмотрена чувствительность результатов прогноза давления начала выноса песка к погрешности в каждом из исходных параметров. Результаты такого анализа можно представить на графиках зависимости итоговой

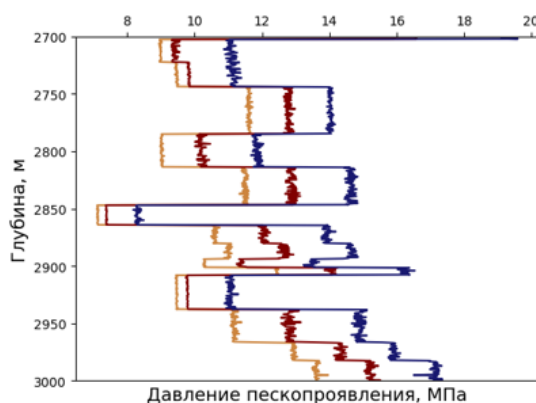


Рис. 3. Пример профилей давления начала пескопроявления. Желтая кривая соответствует 25-му процентилу, красная – 50-му процентилу, а синяя – 75-му процентилу

дисперсии функции плотности распределения давления начала пескопроявления от дисперсии функции плотности распределения отдельно взятого параметра модели для разных коэффициентов D_{dw} .

Результаты, представленные на рисунке 4, позволяют говорить о том, каким образом каждый из рассматриваемых параметров влияет на результаты прогноза давления пескопроявления по отдельности. Параметрами, чувствительность к которым наиболее выражена, оказались максимальное горизонтальное напряжение и упругие модули (чувствительность к коэффициенту Пуассона несколько выше, чем к модулю Юнга). Тем не менее, нельзя исключать изменение результатов прогноза величины минимального давления пескопроявления при совместном анализе различных параметров. Данный вопрос требует отдельного дальнейшего исследования.

Выводы

Решение задач геомеханики в приложениях к вопросам оптимизации освоения месторождений углеводородов выполняется поэтапно, при этом на каждом следующем этапе накапливаются погрешности как физического, так и вычислительного характера. При этом исходные данные – сведения о механических свойствах пород, слагающих коллекторы углеводородов, и их напряженно-деформированном состоянии – изначально характеризуются значительными неоднозначностями. Это обусловлено ограниченностью существующих на сегодняшний день прямых и косвенных геофизических методов изучения пород, залегающих на больших глубинах.

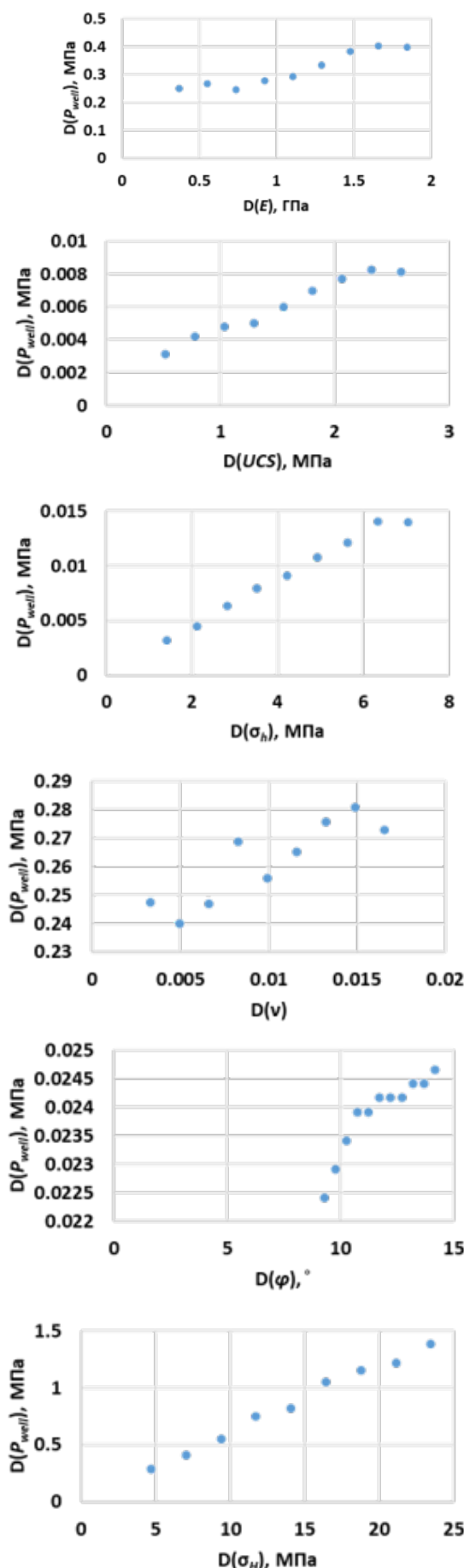


Рис. 4. Зависимость дисперсии минимального давления начала пескопроявления от дисперсии модуля Юнга, коэффициента Пуассона, прочности на одноосное сжатие, угла внутреннего трения, минимального и максимального горизонтальных напряжений

Представленный в работе алгоритм позволяет оценить реальную роль неоднозначности механических свойств и напряженного состояния пород околоскважинной зоны при решении задач геомеханики месторождений на примере определения условий пескопроявления. Решения по выбору режима работы скважин следует принимать с учетом этой неопределенности, что позволит снизить экономические риски разработки месторождений нефти и газа.

Можно рекомендовать внедрение аналогичных подходов с численным анализом неопределенности исходных геофизических данных и в другие подходы к решению прикладных задач геомеханики месторождений углеводородов.

Финансирование

Исследование было проведено в рамках выполнения государственного задания ИФЗ РАН, номер темы FMWU-2025-0034.

Список литературы

1. Дубиня Н.В., Галыбин А.Н. (2018). О распределении напряжений в слоистом массиве горных пород. *Физика Земли*, 6, с. 106–116.
2. Дубиня Н.В., Зиганшин Э.Р., Новикова Е.В. (2024). Статистический анализ результатов реконструкции напряженного состояния по данным о проводимости естественных трещин. *Процессы в геосредах*, 41(3), с. 2636–2648.
3. Зиганшин Э.Р., Дубиня Н.В., Новикова Е.В., Воронов И.А. (2024). Оценка современного напряженно-деформированного состояния массива карбонатных горных пород на нефтяном месторождении. *Russian Journal of Earth Sciences*, 24(5), с. 1–20.
4. Карев В.И., Коваленко Ю.Ф., Устинов К.Б. (2018). Моделирование геомеханических процессов в окрестности нефтяных и газовых скважин. М.: Институт проблем механики им. А.Ю. Ишлинского РАН, 528 с.
5. Andersen O., Kelley M., Smith V., Raziperchikolaei S. (2022). Automatic Calibration of a Geomechanical Model from Sparse Data for Estimating Stress in Deep Geological Formations. *SPE Journal*, Vol. 27(2), P. 1140–1159. <https://doi.org/10.2118/204006-PA>.
6. Ljunggren C., Chang Y., Janson T., Christiansson R. (2003). An overview of rock stress measurement methods. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, V. 40(7), P. 975–989.
7. Muhammad M., Rasol A. A. A. (2025). Advances and challenges of sand production and control in oilfields: A review. *Results in Engineering*, Vol. 26. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104596>.

8. Rahmati H., Jafarpour M., Azadbakht S., Nouri A., Vaziri H., Chan D., Xiao Y. (2013). Review of Sand Production Prediction Models. *Journal of Petroleum Engineering*, 16 p.
9. Ray P. L., Tipton J. R., Cheng S., Francom D. (2024). Wellbore Stability Uncertainty Quantification Using a Bayesian Machine Learning Framework. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, USA. SPE-220771-MS*. <https://doi.org/10.2118/220771-MS>.
10. Song I., Chang C. (2017). In situ stress conditions at IODP Site C0002 reflecting the tectonic evolution of the sedimentary system near the seaward edge of the Kumano basin offshore from SW Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, V. 122, 20 p.
11. Zheng D., Zhang B., Chalaturnyk R. (2024). Quantifying Uncertainty of In-Situ Horizontal Stress and Geotechnical Parameters Using a Bayesian Inference Approach for Pressuremeter Tests. *Canadian Geotechnical Journal*, Vol. 62, P. 1–23. <https://doi.org/10.1139/cgj-2023-0686>.
12. Zoback M.D. (2007). *Reservoir Geomechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, P. 505.

Сведения об авторах

Новикова Елена Валерьевна – научный сотрудник, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ИФЗ РАН, 123242,

Россия, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1
e-mail: helenvn97@gmail.com

Собаев Александр Григорьевич – ведущий инженер, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ИФЗ РАН, 123242,

Россия, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1
e-mail: sobaev.a.g@mail.ru

Воронов Иван Андреевич – ведущий инженер, Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, ИФЗ РАН, 123242,

Россия, г. Москва, Б. Грузинская ул., д. 10, стр. 1
e-mail: ivanvoronov1996@yandex.ru

References

1. Dubinya, N.V., & Galybin, A.N. (2018). On stress distribution in a layered rock mass. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, (6), 106–116.
2. Dubinya, N.V., Ziganshin, E.R., & Novikova, E.V. (2024). Statistical analysis of in-situ stress reconstruction results based on natural fracture conductivity data. *Processes in Geosystems*,

- 41(3), 2636–2648.
3. Ziganshin, E.R., Dubinya, N.V., Novikova, E.V., & Voronov, I.A. (2024). Assessment of the present-day stress-strain state of a carbonate rock mass at an oil field. *Russian Journal of Earth Sciences*, 24(5), 1–20.
 4. Karev, V.I., Kovalenko, Yu.F., & Ustinov, K.B. (2018). Modeling of geomechanical processes in the near-wellbore zone of oil and gas wells. Moscow: *Ishlinsky Institute for Problems in Mechanics, Russian Academy of Sciences*, 528 pp.
 5. Andersen, O., Kelley, M., Smith, V., & Raziperchikolaee, S. (2022). Automatic calibration of a geomechanical model from sparse data for estimating stress in deep geological formations. *SPE Journal*, 27(2), 1140–1159. <https://doi.org/10.2118/204006-PA>
 6. Ljunggren, C., Chang, Y., Janson, T., & Christiansson, R. (2003). An overview of rock stress measurement methods. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 40(7), 975–989.
 7. Muhammad, M., & Rasol, A.A.A. (2025). Advances and challenges of sand production and control in oilfields: A review. *Results in Engineering*, 26, 104596. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.104596>
 8. Rahmati, H., Jafarpour, M., Azadbakht, S., Nouri, A., Vaziri, H., Chan, D., & Xiao, Y. (2013). Review of sand production prediction models. *Journal of Petroleum Engineering*, 2013, 16 pp.
 9. Ray, P.L., Tipton, J.R., Cheng, S., & Francom, D. (2024). Wellbore stability uncertainty quantification using a Bayesian machine learning framework. *SPE Annual Technical Conference and Exhibition, New Orleans, Louisiana, USA. SPE-220771-MS*. <https://doi.org/10.2118/220771-MS>
 10. Song, I., & Chang, C. (2017). In situ stress conditions at IODP Site C0002 reflecting the tectonic evolution of the sedimentary system near the seaward edge of the Kumano basin offshore from SW Japan. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 122, 20 pp.
 11. Zheng, D., Zhang, B., & Chalaturnyk, R. (2024). Quantifying uncertainty of in-situ horizontal stress and geotechnical parameters using a Bayesian inference approach for pressuremeter tests. *Canadian Geotechnical Journal*, 62, 1–23. <https://doi.org/10.1139/cgj-2023-0686>
 12. Zoback, M.D. (2007). *Reservoir geomechanics*. Cambridge: Cambridge University Press, 505 pp.

About the authors

Elena V. Novikova – researcher, Schmidt Institute of Physics of the Earth
1, building 10, B. Gruzinskaya str., Moscow, 123242, Russian Federation
e-mail: helenvn97@gmail.com

Alexander G. Sobaev – senior Engineer, Schmidt Institute of Physics of the Earth
1, building 10, B. Gruzinskaya str., Moscow, 123242, Russian Federation
e-mail: sobaev.a.g@mail.ru

Ivan A. Voronov – senior Engineer, Schmidt Institute of Physics of the Earth
1, building 10, B. Gruzinskaya str., Moscow, 123242, Russian Federation
e-mail: ivanvoronov1996@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 06.05.2026;

Принята к публикации 24.06.2026;

Опубликована 30.06.2026