

ВЫДЕЛЕНИЕ ВЫСОКОПРОВОДЯЩИХ ПУТЕЙ ФИЛЬТРАЦИИ И ЗОН ТРЕЩИНОВАТОСТИ ПРИ ПОМОЩИ АКУСТИЧЕСКОГО КАРОТАЖА

Ю. Б. Чен-лен-сон

Федеральное государственное автономное учреждение «Федеральный научный центр Научно-исследовательский институт системных исследований Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», г. Москва, Российская Федерация
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7484-6872>, ✉ chen-len-sony@mail.ru

Аннотация: статья посвящена применению анализа волны Стоунли акустического каротажа полного волнового пакета для выявления высокопроводящих путей фильтрации и зон трещиноватости в нефтегазовых коллекторах. Рассмотрены физические основы распространения волны Стоунли в системе «скважина-порода» и механизмы ее взаимодействия с проницаемыми зонами и трещинами. Показано, что затухание волны Стоунли обусловлено пороупругим взаимодействием, описываемым теорией Био–Розенбаума, и монотонно возрастает с увеличением проницаемости породы. Трещины, пересекающие ствол скважины, проявляются как резкие локальные аномалии затухания и амплитуды волны. Представлена методика измерений и обработки данных, включающая выделение волны Стоунли, расчет ее кинематических и динамических параметров, а также количественную интерпретацию с использованием петрофизических моделей. Проанализированы факторы, влияющие на измерения: условия в скважине, свойства бурового раствора, литология, пористость, насыщенность флюидами, температура и напряженное состояние пород. Рассмотрены современные российские приборы широкополосного акустического каротажа, обеспечивающие технологическую независимость отечественной нефтегазовой отрасли. Описаны практические применения метода на различных этапах освоения месторождений: от поисково-разведочного бурения до оптимизации систем разработки. Метод особенно эффективен для характеристики трещиноватых карбонатных коллекторов, планирования гидроразрыва пласта и контроля обводненности. Включение широкополосной акустики в стандартный комплекс геофизических исследований позволит существенно повысить эффективность разработки месторождений углеводородов.

Ключевые слова: волна Стоунли, акустический каротаж, высокопроводящие пути фильтрации, трещиноватость, проницаемость, пороупругость, нефтегазовые коллекторы, геофизические исследования скважин.

Для цитирования: Чен-лен-сон Ю. Б. Выделение высокопроводящих путей фильтрации и зон трещиноватости при помощи акустического каротажа. *Успехи кибернетики*. 2025;6(4):29–34.

Поступила в редакцию: 23.10.2025.

В окончательном варианте: 05.12.2025.

STONELEY WAVE ANALYSIS FOR DETECTION OF HIGH-CONDUCTIVITY FLOW PATHS AND FRACTURE ZONES IN OIL AND GAS RESERVOIRS

Yu. B. Chen-len-son

Scientific Research Institute for System Analysis of the National Research Centre “Kurchatov Institute”,
Moscow, Russian Federation

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7484-6872>, ✉ chen-len-sony@mail.ru

Abstract: we studied the use of Stoneley-wave analysis from full-waveform acoustic logs to detect and characterize high-conductivity flow paths and fracture zones in oil and gas reservoirs. We examined the physical principles of Stoneley-wave propagation in the borehole-formation system and the mechanisms that control its response to permeable zones and fractures. Stoneley-wave attenuation is controlled by poroelastic effects described by the Biot–Rosenbaum model and increases steadily with formation permeability. Fractures that cut the wellbore appear as sharp local anomalies in Stoneley-wave attenuation and amplitude.

We presented the measurement and processing workflow, including Stoneley-wave extraction, calculation of its kinematic and dynamic parameters, and quantitative interpretation using petrophysical models. We analyzed the main factors that affect these measurements: borehole conditions, drilling-fluid properties, lithology, porosity, fluid saturation, temperature, and in-situ stress. We also reviewed modern Russian broadband acoustic logging tools that support technological independence of the domestic oil and gas sector.

We described practical applications of the method at different stages of field development, from exploration drilling to production optimization. The approach is especially effective for characterizing fractured carbonate reservoirs, planning hydraulic-fracturing operations, and managing water cut. Integrating broadband acoustic logs into standard well-logging programs significantly improves the efficiency of hydrocarbon-field development.

Keywords: Stoneley wave, acoustic logging, high-conductivity flow paths, fracturing, permeability, poroelasticity, oil and gas reservoirs, well logging.

Cite this article: Chen-len-son Yu. B. Stoneley Wave Analysis for Detection of High-Conductivity Flow Paths and Fracture Zones in Oil and Gas Reservoirs. *Russian Journal of Cybernetics*. 2025;6(4):29–34.

Original article submitted: 23.10.2025.

Revision submitted: 05.12.2025.

Введение

В современной нефтегазовой промышленности одной из ключевых задач является выявление высокопроницаемых путей фильтрации флюидов в пласте. Эти пути могут быть представлены естественными трещинами, кавернами, зонами повышенной проницаемости или техногенными каналами. Их наличие критически влияет на эффективность разработки месторождений, успешность гидроразрыва пласта, контроль обводненности и прогнозирование прорывов воды или газа [1, 2].

Формирование высокопроницаемых путей фильтрации флюидов в пласте происходит под влиянием различных геологических процессов: тектонических движений, приводящих к образованию систем трещин и разломов; процессов выщелачивания и карстообразования, особенно в карбонатных породах; а также техногенного воздействия на пласт в процессе разработки месторождения [3].

Традиционные методы оценки проницаемости, основанные на анализе керна или стандартных каротажных данных, часто не позволяют обнаружить высокопроницающие пути, особенно если они представлены субвертикальными трещинами или имеют ограниченное распространение. Акустический каротаж полного волнового пакета и, в частности, анализ волны Стоунли (Stoneley wave) предоставляет уникальную возможность дистанционного выявления таких зон непосредственно в скважинных условиях [5, 6].

Волна Стоунли представляет собой интерфейсную волну, распространяющуюся вдоль границы раздела «скважина-порода». Ее особенность заключается в высокой чувствительности к гидравлической связи ствола скважины с пластом. Когда волна Стоунли проходит мимо проницаемой зоны или трещины, часть ее энергии расходуется на возбуждение движения флюида в пласте, что приводит к затуханию волны и изменению ее скорости [1, 2]. Это регистрируется приемниками акустического зонда и используется для оценки проницаемости и выявления трещин.

Физические основы распространения волны Стоунли

Волна Стоунли является одним из типов упругих волн, регистрируемых при акустическом каротаже полного волнового пакета. Она распространяется вдоль стенки скважины с низкой скоростью (обычно немного ниже скорости звука в буровом растворе) и характеризуется максимальной амплитудой среди всех типов волн в акустическом сигнале (рис. 1).

Физически волна Стоунли представляет собой колебательную систему, в которой участвуют как флюид в скважине, так и породы околоскважинной зоны. При прохождении волны происходит радиальное перемещение флюида у стенки скважины, которое вызывает деформацию породы. В непроницаемой породе эта деформация является чисто упругой и волна распространяется без потерь энергии, за исключением небольшого геометрического затухания и внутреннего трения в породе и флюиде [7].

Ситуация кардинально меняется при наличии проницаемости. Радиальное движение флюида, вызванное волной Стоунли, создает периодический градиент давления на границе скважины. Этот процесс описывается уравнениями Био [1, 2] и приводит к потерям энергии волны, которые проявляются как затухание.

Величина затухания волны Стоунли зависит от частоты волны, проницаемости породы, вязкости флюида и геометрии порового пространства. Эта зависимость была теоретически описана в работах Био, Розенбаума и других исследователей [1, 2, 3]. Ключевым параметром является так называемая характеристическая частота Био, которая разделяет низкочастотный режим (где флюид в порах успевает следовать за деформацией твердого скелета) и высокочастотный режим (где возникают значительные вязкие потери).

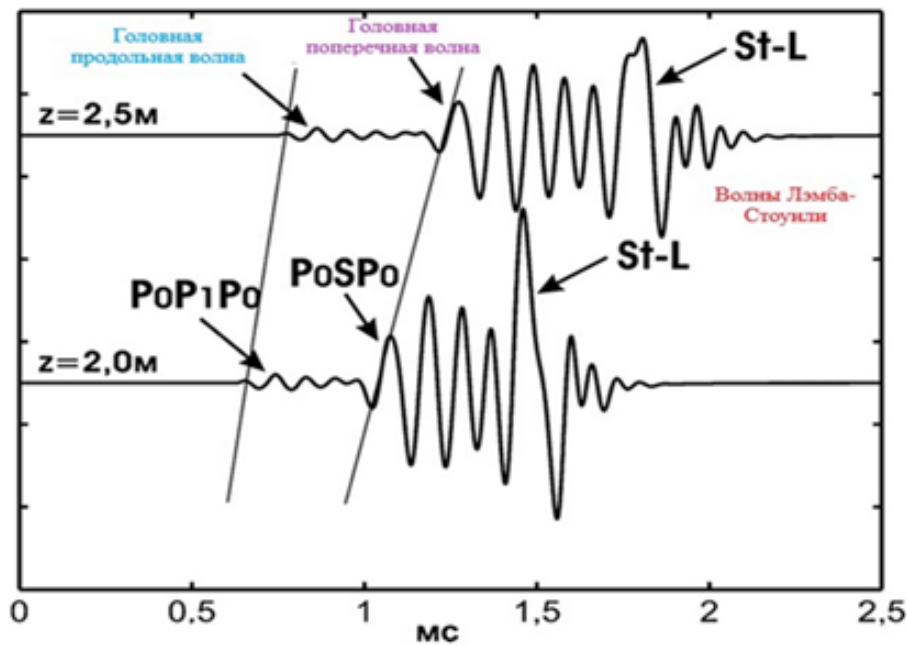


Рис. 1. Волновой пакет акустического каротажа

Для частот волны Стоунли (1–5 кГц) и проницаемостей коллекторов (от миллиарда до нескольких дарси) реализуется переходный режим, в котором затухание волны Стоунли чувствительно к проницаемости. Математическое описание этого процесса достаточно сложно и требует численного моделирования, однако качественно можно утверждать, что затухание волны Стоунли монотонно возрастает с увеличением проницаемости [4, 5].

Механизм взаимодействия волны Стоунли с трещинами

Особый интерес представляет взаимодействие волны Стоунли с трещинами, пересекающими ствол скважины. Трещина представляет собой разрыв сплошности породы с раскрытием от микрон до миллиметров.

Когда волна Стоунли достигает открытой в скважину трещины, происходит резкое изменение граничных условий. Трещина действует как зона с высокой «проницаемостью». Это приводит к нескольким наблюдаемым эффектам [5, 6]:

- резкое затухание амплитуды волны. Часть энергии волны расходуется на возбуждение колебаний флюида внутри трещины. Открытая трещина с раскрытием в несколько десятых миллиметра может поглотить до 50–70% энергии волны Стоунли;
- изменение скорости распространения волны. Наличие трещины удлиняет путь волны вдоль границы раздела «скважина-порода», что приводит к уменьшению скорости волны Стоунли в зоне трещины. Этот эффект хорошо заметен для широких открытых трещин.

Чувствительность волны Стоунли к трещинам зависит от их ориентации в пространстве. Трещины, пересекающие скважину под большими углами (субперпендикулярные), создают максимальный эффект, в то время как субпараллельные трещины могут быть практически невидимы для волны Стоунли, но проявляются в изменении скоростей других типов волн (например, поперечных волн) [6, 7].

Методика измерений и обработки данных

Современные акустические зонды для каротажа полного волнового пакета представляют собой сложные многоэлементные устройства. Типичный зонд включает один или несколько излучателей (обычно монополюсных или дипольных) и массив приемников, расположенных на различных расстояниях от излучателя.

Излучатель генерирует широкополосный акустический импульс, который возбуждает в системе «скважина-порода» различные типы волн: продольные, поперечные, волну Стоунли. Эти волны распространяются вдоль скважины с различными скоростями и регистрируются приемниками в виде сложного многокомпонентного сигнала [8].

Выявление высокопроводящих путей фильтрации

Высокопроводящие пути фильтрации в пласте могут быть представлены различными геологическими объектами: естественными трещинами, кавернами. Все эти объекты объединяет то, что они обеспечивают преимущественные пути движения флюидов с проницаемостью, значительно превышающей матричную проницаемость породы.

Волна Стоунли обладает высокой чувствительностью к таким зонам благодаря механизму порупругого взаимодействия [4, 5].

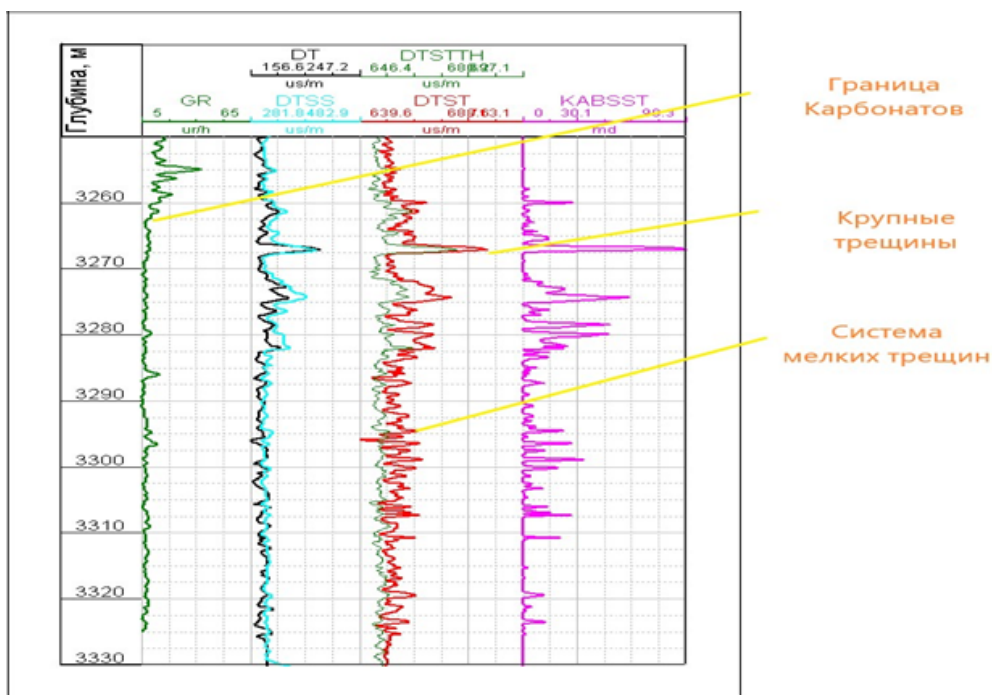


Рис. 2. Пример влияния трещиноватости на волны Стоунли

Типичные признаки высокопроводящего пути на данных волны Стоунли:

- резкое увеличение затухания. В зоне повышенной проницаемости коэффициент затухания волны Стоунли может увеличиваться в несколько раз по сравнению с фоновыми значениями. Для трещин характерна узкая (10–30 см) локализованная аномалия, тогда как зоны повышенной матричной проницаемости создают более широкие (метры) зоны повышенного затухания. Для оценки строится непрерывный каротажный профиль затухания, на котором высокопроницаемые зоны проявляются как пики (рис. 2);

- уменьшение скорости. Высокопроницаемые зоны характеризуются пониженной эффективной жесткостью, что приводит к снижению скорости волны Стоунли. Этот эффект менее выражен, чем изменение затухания, но может служить дополнительным диагностическим признаком.

Важным аспектом является разделение эффектов проницаемости матрицы и трещиноватости. Матричная проницаемость создает относительно плавные изменения затухания волны Стоунли, коррелирующие с литологией и пористостью. Трещины же проявляются как резкие локальные аномалии с характерной шириной, определяемой раскрытием трещины и разрешающей способностью метода (рис. 3).

Корреляция с имиджами ствола скважины (акустическими или резистивиметрическими) позволяет визуально подтвердить наличие трещин и оценить их ориентацию [7, 8].

Современные подходы к интерпретации включают использование машинного обучения и нейронных сетей для автоматического выделения аномальных зон. Обучающие выборки формируются на основе скважин с известными характеристиками (данные керна, испытаний, продуктивности), после чего модель применяется для предсказания свойств в новых скважинах.

На приведенных выше примерах (рис. 2 и рис. 3) показано наличие и отсутствие признаков трещиноватости при анализе волны Стоунли. Эти выводы были подтверждены целым рядом гидродинамических исследований.

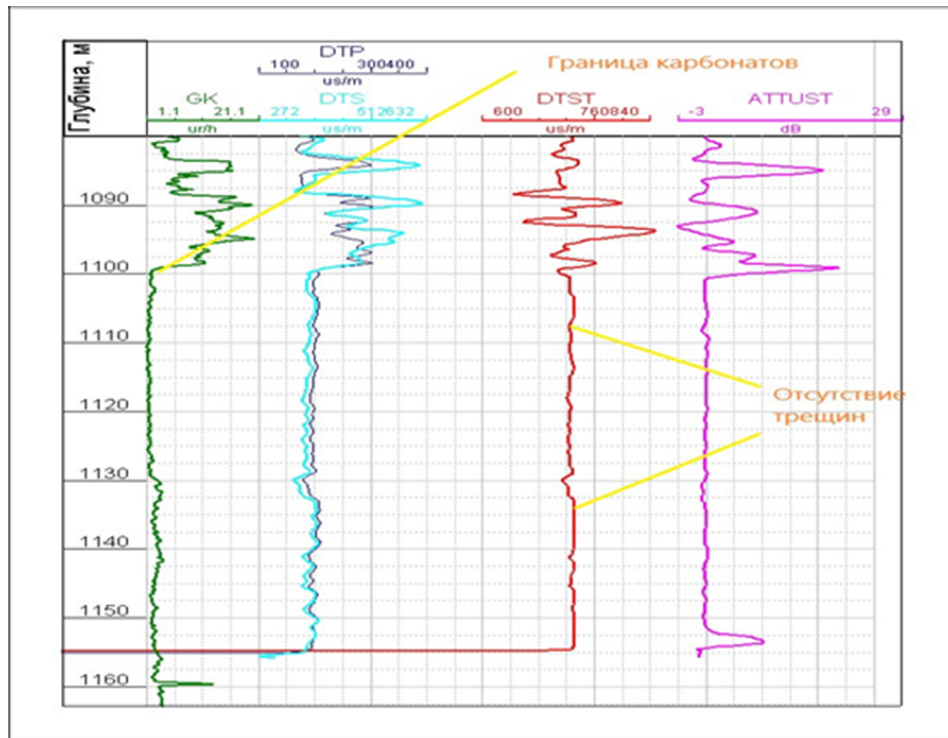


Рис. 3. Пример отсутствия трещиноватости и наличия только матричной проницаемости

Детектирование и характеристика трещин

Трещиноватость является одним из наиболее важных факторов, определяющих фильтрационно-емкостные свойства коллекторов, особенно в карбонатных и низкопроницаемых терригенных породах. Трещины могут увеличивать эффективную проницаемость пласта на несколько порядков величины, создавать анизотропию фильтрационных свойств и определять направления преимущественного движения флюидов [9].

Волна Стоунли предоставляет уникальные возможности для выявления и характеристики трещин, пересекающих ствол скважины. Основные параметры трещин, которые могут быть оценены по данным волны Стоунли:

- наличие и положение трещины. Открытая проводящая трещина проявляется как резкая локальная аномалия на профилях затухания и амплитуды волны Стоунли. Ширина аномалии определяется раскрытием трещины, углом ее пересечения со скважиной и разрешающей способностью метода (обычно 15–30 см). Точность локализации трещины составляет 5–10 см, что сопоставимо с данными имиджей ствола скважины [5, 6];

- раскрытие трещины. Величина аномалии затухания или потери амплитуды волны Стоунли связана с раскрытием трещины. Для количественной оценки используются теоретические и эмпирические модели, связывающие измеренное затухание с эффективным раскрытием. Типичный диапазон чувствительности составляет от 10 микрон до нескольких миллиметров. Трещины с раскрытием менее 10 микрон обычно не создают заметного эффекта, в то время как трещины с раскрытием более 1 мм могут практически полностью поглощать волну Стоунли [4, 5];

- частота трещиноватости. В зонах интенсивной трещиноватости, где расстояние между трещинами сопоставимо с разрешением метода, отдельные трещины могут не разрешаться, но проявляется общее повышение затухания волны Стоунли. Это позволяет выделять зоны повышенной трещиноватости и оценивать среднюю проницаемость трещиноватой среды [7, 8].

Важным аспектом является учет ориентации трещин. Волна Стоунли наиболее чувствительна к трещинам, пересекающим скважину под большими углами. Для выявления субвертикальных трещин в вертикальных скважинах эффективнее использовать анализ поперечных волн, возбуждаемых дипольным излучателем, которые чувствительны к азимутальной анизотропии. Комбинирование данных монополюсного (волна Стоунли) и дипольного (поперечные волны) каротажа позволяет получить более полную характеристику системы трещин [6].

Современные российские приборы широкополосного акустического каротажа

ООО «Научно-производственное предприятие «Тверьгеофизика» — прибор АСПЕКТ (акустическая система для петрофизических исследований и контроля технического состояния).

АО «Сибирская геофизическая научно-производственная компания» (СибГНПК) — приборы ЗВУК-3 и СОННИК.

АО «Ижевский радиозавод» (ИРЗ) — прибор АКРП-1 (акустический каротаж с расширенными параметрами).

ООО «ГеоТЭК» — прибор УЗОР-2 (ультразвуковой зонд для оценки резервуаров).

ОАО «Каротаж» (г. Бийск) — прибор ТЕЛЕСКОП-М.

АО «Научно-производственная фирма «Геофизика» (г. Уфа) — прибор ВОЛНА-АК.

Выводы

Анализ волны Стоунли для выявления высокопроводящих путей фильтрации и трещин должен находить широкое применение на различных этапах освоения месторождений в процессе оценки коллекторских свойств при поисково-разведочном бурении. Выявление проницаемых интервалов и трещиноватых зон позволяет оптимизировать программу испытаний и отбора керна. Данные волны Стоунли позволят определить интервалы для перфорации и прогнозировать продуктивность пластов. Особенно ценна информация о вертикальной проницаемости и гидравлической связи между пластами, которую сложно получить другими методами.

К сожалению, большая часть работ с широкополосной акустикой в России была выполнена до настоящего времени зарубежными сервисными компаниями, у которых она входит в обязательный комплекс. Этот комплекс могут себе позволить далеко не все нефтяные компании ввиду довольно высокой стоимости. Однако имеются приборы, выпускаемые российскими производителями. Если попытаться включить широкополосную акустику в стандартный комплекс геофизических исследований скважин, который проводится на всех скважинах в России, то мы получим значительный объем дополнительной информации, позволяющей повысить эффективность поиска, разведки и эксплуатации нефтяных и газовых месторождений.

ЛИТЕРАТУРА

1. Biot M. A. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. I. Low-Frequency Range. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1956;28(2):168–178. DOI: doi.org/10.1121/1.1908239.
2. Biot M. A. Theory of Propagation of Elastic Waves in a Fluid-Saturated Porous Solid. II. Higher Frequency Range. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1956;28(2):179–191. DOI: doi.org/10.1121/1.1908241.
3. Rosenbaum J. H. Synthetic Microseismograms: Logging in Porous Formations. *Geophysics*. 1974;39(1):14–32. DOI: doi.org/10.1190/1.1440407.
4. Tang X. M., Cheng C. H., Toksöz M. N. Dynamic Permeability and Borehole Stoneley Waves: A Simplified Biot–Rosenbaum Model. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1991;90(3):1632–1646. DOI: doi.org/10.1121/1.401904.
5. Winkler K. W., Liu H. L., Johnson D. L. Permeability and Borehole Stoneley Waves: Comparison between Experiment and Theory. *Geophysics*. 1989;54(1):66–75. DOI: doi.org/10.1190/1.1442578.
6. Cheng C. H., Toksöz M. N. Determination of Shear Wave Velocities in “Slow” Formations. Paper presented at the SPWLA 24th Annual Logging Symposium, Calgary, Alberta, June 1983. Paper Number: SPWLA-1983-V, published: June 27 1983.
7. Добрынин В. М., Вендельштейн Б. Ю., Кожевников Д. А. *Петрофизика: Учебник для вузов*. 2-е изд., перераб. и доп. М.: Нефть и газ; 2004. 368 с. ISBN: 5-7246-0295-4.
8. Итенберг С. С., Шнурман Г. А. *Интерпретация результатов каротажа сложных коллекторов*. М.: Недра; 1984. 256 с.
9. Николаевский В. Н., Басниев К. С., Горбунов А. Т., Зотов Г. А. *Механика насыщенных пористых сред*. М.: Недра; 1970. 339 с.