

## ОЦЕНКА ПРОЦЕССОВ ПРОСЕДАНИЯ ЗЕМНОЙ ПОВЕРХНОСТИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ГАЗОВЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ (НА ПРИМЕРЕ СЕВЕРО-СТАВРОПОЛЬСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ)

В.С. Жуков, Ю.О. Кузьмин, Г.А. Полоудин  
(НПФ "Центр газгеофизика" ДОО "Газпромгеофизика", ОИФЗ РАН)

Рассмотрены существующие методы оценки просадок земной поверхности при разработке месторождений газа. Предложен и реализован аналитический способ расчета просадок с учетом геологического строения месторождения и физических свойств пород-коллекторов. Показано соответствие рассчитанных просадок и фактических данных нивелирования. Приведен анализ геодинамических последствий разработки месторождения. Сделан вывод о необходимости специальных работ по геодинамическому мониторингу месторождений и подземных хранилищ газа с целью повышения их геодинамической безопасности.

The existing methods of an evaluation subsidence for want of to development deposits of gas are considered. It is offered and realized the analytical method of calculation subsidence with allowance for of geological structure of the deposit and physical properties of rocks-collectors. The good correspondence designed subsidence and fact sheet leveling is shown. The analysis of geodynamic consequences of development of a deposit is indicated. The conclusion about necessity of realization of special work on geodynamic monitoring of deposits and underground storehouses of gas is made with the purpose of increase of their geodynamic safety.

Общеизвестно, что длительная разработка месторождений углеводородов приводит к нарушению равновесных условий в недрах и может вызвать значительные изменения напряженно-деформированного состояния как пластов-коллекторов, так и вышележащих пород-покрышек. С учетом того, что многие крупные месторождения газа охватывают значительные площади, а подземные хранилища газа размещены вблизи крупных промышленных районов, возникает необходимость контроля за возможными техногенными последствиями их эксплуатации и, безусловно, актуальна оценка современного геодинамического состояния недр.

Исследование современного напряженно-деформированного состояния недр является основной задачей геодинамики. В числе явлений, наиболее хорошо изученных и подтвержденных документами, находятся случаи аномальных деформаций (обычно просадок) земной поверхности на территории длительно разрабатываемых нефтяных и газовых месторождений, связываемые с добычей нефти и газа и снижением пластового давления. Причем, исходя из теории упругости, любое изменение давления газа в пласте-коллекторе ( $P_{пл}$ ) приводит к изменению эффективного напряжения ( $\sigma_{эф}$ ) в пласте:

$$\sigma_{эф} = \sigma_r - n \cdot P_{пл} \quad (1)$$

где  $\sigma_r$  — геостатическое давление, которое определяется толщиной и плотностью вышележащих горных пород;  $n$  — коэффициент разгрузки, зависящий от свойств скелета породы и слагающих ее минералов. Возможные изменения коэффициента  $n$  заклю-

чены в пределах 0...1, причем для высокопористых песчаных коллекторов  $n = 1$ , а среднее его значение можно принять равным 0,85 [1].

Изменение напряжения по закону Гука ( $\sigma = E \cdot \epsilon$ ) должно приводить к пропорциональному изменению деформации объекта, т. е. к перемещению границы объекта на величину  $\Delta l$  на базе  $l$  ( $\epsilon = \Delta l/l$ ). Применительно к месторождениям газа это означает опускание земной поверхности в зоне отбора газа.

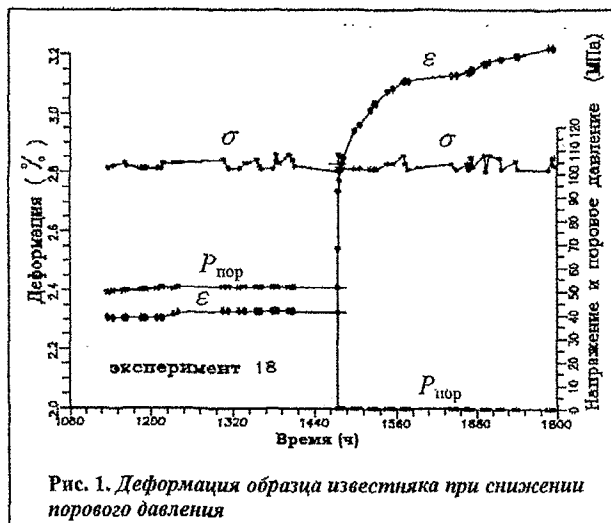
Попробуем оценить величину просадок поверхности на базе имеющихся

лабораторных данных и аналитических расчетов. Результаты экспериментальных исследований образцов горных пород [2] (рис. 1) показывают, что величина их деформации при снижении порового давления на 1 МПа имеет порядок  $(1...5) \cdot 10^{-5}$ .

Аналитические оценки просадок земной поверхности исходят из нескольких предпосылок. В общем, уменьшение толщины пластов при снижении пластового давления выражается формулой:

$$\Delta H = \int_0^{HP} \int_{P_0} \beta_{сж} \Delta P_{пл} dz, \quad (2)$$

где  $\Delta H$  — изменение толщины пласта;  $\Delta P_{пл} = P_0 - P_1$  — изменение пластового давления;  $\beta_{сж}$  — коэффици-



ент сжимаемости при одноосной нагрузке, зависящий от состава пород и эффективного напряжения;  $z$  — глубина залегания пород.

Зачастую принимается, что  $\beta_{сж}$  не зависит от  $P_{пл}$ ,  $\Delta P_{пл}$  одинаково по всему разрезу, порода однородна и деформируется только пласт-коллектор, а толщина вышележащих пород остается неизменной. С учетом этого деформация пласта-коллектора будет равна деформации земной поверхности ( $\Delta h$ ):

$$\Delta H = \Delta h = H \cdot \beta_{сж} \cdot \Delta P_{пл} \quad (3)$$

Подземное хранилище газа, образованное на базе истощенного Северо-Ставропольско-Пелагиадинского месторождения, имеет два объекта для хранения газа — в хадумском горизонте и зеленой свите, которые существенно отличаются по своим характеристикам и режимам работы [3]. В 1957—1962 гг. разрабатывался в основном только хадумский горизонт, поэтому кратко рассмотрим его геологическое строение и параметры.

Хранилище в хадумском горизонте приурочено к двум поднятиям: Северо-Ставропольскому и Пелагиадинскому, разобщенным неглубокой седловиной. Хадумская залежь — пластовая, сводовая, со значительной зоной отсутствия подошвенной воды, территориально совпадающей с первым поднятием. Продуктивный пласт представлен двумя пачками: алевролитовой и переслаивания. Первая из них сложена преимущественно кварцевыми алевролитами толщиной 25...35 м с высокими коллекторскими свойствами и газонасыщенностью 80...85 %. Алевролитовая пачка с глубиной постепенно переходит в пачку переслаивания, сложенную тонко чередующимися пропластками песчаника, алевролитов и глин. Залежь находилась в разработке более 27 лет. За это время из нее было извлечено 93 % начальных запасов газа, что привело к пропорциональному снижению пластового давления в полном соответствии с газовым режимом работы пласта. Последнее обстоятельство в сочетании с другими горно-геологическими особенностями (большой газонасыщенный объем порового пространства, хорошие коллекторские свойства, небольшая глубина залегания — 800 м) позволило создать крупнейшее в мире подземное хранилище газа (ПХГ) с высокими технико-экономическими показателями. В 1984 г. ПХГ было введено в эксплуатацию с использованием скважин, газопромыслового оборудования и дожимных компрессорных станций, унаследованных от месторождения. Отбор газа из хранилища осуществляют с помощью этих и вновь построенных дожимных компрессорных станций в две ступени сжатия. Хранилище выгодно расположено в узле пересечения мощных газотранспортных систем и в непосредственной близости от крупных потребителей газа, что также повышает его регулируемую роль в Единой газоснабжающей системе (ЕГС) страны.

Подставив в формулу (2) значения для хадумской толщи ( $\beta_{сж} = 2,78 \cdot 10^{-4}$  1/МПа,  $H = 70$  м (эффектив-

ная мощность пласта 70 м), получим аналитическую оценку просадки земной поверхности в центральной части месторождения, равную 23,7 мм, при снижении пластового давления ( $\Delta P_{пл}$ ) на 1,22 МПа за период 1957—1962 гг. [4]. Фактические данные о просадках земной поверхности, полученные в результате специально проводившихся работ по нивелированию на территории Северо-Ставропольско-Пелагиадинского месторождения, значительно больше этой величины (таблица).

| Номер профиля | Номер репера | $\Delta h$ (мм) |
|---------------|--------------|-----------------|
| 1             | 516          | 0               |
| 1             | Рабочий 1    | 22              |
| 1             | 532          | 58              |
| 1             | 556          | 113             |
| 1             | 504          | 156             |
| 1             | 585          | 117             |
| 2             | Грунтовый 2  | 84              |
| 2             | Грунтовый 1  | 99              |
| 2             | Грунтовый 4  | 102             |
| 3             | Грунтовый 3  | 114             |

Другой подход, позволяющий учитывать в первом приближении размеры пласта-коллектора и его геометрию, рассмотрен в работах Ю.О. Кузьмина [5, 6]. При этом учитывается, что гидростатическое сжатие пласта при отборе флюида приводит к деформациям удлинения и опускания тех участков земной поверхности, которые расположены в зоне отбора флюида. Подобный процесс поддается количественной оценке, если принять продуктивный пласт в виде прямоугольного горизонтально ориентированного включения с аномальной (избыточной) объемной деформацией ( $\Delta \epsilon_v$ ).

Тогда, как показано в работе [6], связь деформации земной поверхности  $\Delta h$  (просадки, превышения) с деформацией пласта-коллектора на глубине описывается формулой:

$$\Delta h = \Phi \cdot \Gamma, \quad (4)$$

где  $\Phi = \Delta P_{пл}/K$  — физический множитель, описывающий интенсивность деформационной аномалии;  $K$  — объемный модуль упругости пород,  $\Delta P_{пл}$  — изменение пластового давления;  $\Gamma$  — геометрический множитель, описывающий пространственную конфигурацию деформационной аномалии в зависимости от формы тела, образующего аномалию.

Так, для горизонтального пластообразного включения бесконечной длины [6]

$$\Gamma = (x+a) \cdot \ln \{ [(x+a)^2 + d^2] / [(x+a)^2 + D^2] \} - (x-a) \times \ln \{ [(x-a)^2 + d^2] / [(x-a)^2 + D^2] \} - 2D \cdot \{ \arctg[(x+a)/D] - \arctg[(x-a)/D] \} + 2d \cdot \{ \arctg[(x+a)/D] - \arctg[(x-a)/D] \}. \quad (5)$$

Здесь  $d$  и  $D$  — глубина залегания кровли и подошвы пласта, в котором происходят изменения пластового давления;  $a$  — половина ширины пласта. Для оценки максимальной амплитуды просадки в центре отбора (закачки) можно принять  $x = 0$ . Тогда выражение (5) примет вид:

$$\Delta h = \frac{\Delta P_{пл}}{K} \cdot \{2a \ln [(a^2 + d^2)/(a^2 + D^2)] - 2D \cdot [\arctg(a/D) - \arctg(-a/D)] + 2d \cdot [\arctg(a/D) - \arctg(-a/D)]\}. \quad (6)$$

Подставив значения для хадумской толщи:  $\Delta P_{пл} = 1,22$  МПа,  $1/K = 2,78 \cdot 10^{-4}$  1/МПа,  $a = 10000$  м,  $d = 750$  м,  $D = 820$  м (эффективная толщина пласта 70 м), получим величину просадки земной поверхности в центральной части месторождения, равную 142 мм. Распределение рассчитанных по формуле (5) просадок по профилю, пересекающему месторождение, приведено на рис. 2. Там же показаны данные, полученные в результате нивелировки на месторождении в 1962 г., и приведен диапазон двойной погрешности измерений.

Репер 516, расположенный вне Северо-Ставропольско-Пелагиадинской площади, взят специально для того, чтобы показать связь деформационных процессов с разработкой месторождения.

Приведенная ранее в работе [7] максимальная просадка до 92,1 см в 1979 г. при разработке месторождения не противоречит расчетам. Она могла наблюдаться при снижении пластового давления на 7...8 МПа.

Вертикальные перемещения амплитудой 1 см могут быть уверенно выявлены методами высокоточной геодезической съемки. Более корректную и точную оценку просадок земной поверхности в зависимости от изменения пластового давления можно выполнить по конкретным объектам, зная их геолого-геофизические данные и свойства горных пород, слагающих разрез. Считаем, что в данном случае целесообразно ограничиться в первом приближении этой оценкой. Тем более, что близкие значения получены путем аналитических расчетов рядом других исследователей [6].

Просадки опасны не сами по себе, а теми последствиями, которые они вызывают. Так, просадка амплитудой несколько сантиметров (при интенсивном отборе газа), а затем подъем поверхности (при закачке газа в пласт) формируют цикл "сжатие—растяжение" в стволе скважины. Расчет деформации при максимальной просадке, равной 92 см на базе 1000 м, дает величину  $0,92 \cdot 10^{-3}$  (0,092 %), что на-

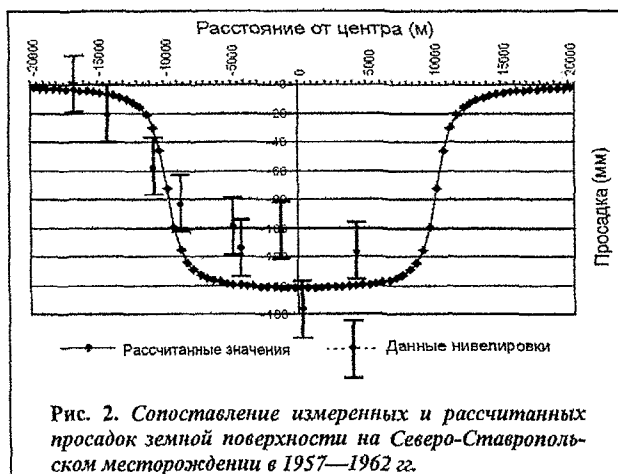
много превышает допустимый уровень деформаций труб обсадных колонн, "ослабленных" к тому же специальными муфтами двухступенчатого цементирования. Разнородные компоненты конструкции скважины — металлическая обсадная колонна и цементное кольцо — при этом деформируются по-разному, в соответствии с их механическими свойствами. В результате нарушается их целостность, что, в свою очередь, может привести к заколонным и межпластовым перетокам газа. Неуправляемые перетоки газа в сочетании с наличием газопроницаемых пластов способны стать причиной "родничков", грифонов и салз в совершенно неожиданных местах, иногда на больших расстояниях от скважин-разгерметизаторов.

Как показано выше, закачка и отбор газа на ПХГ сопровождаются деформационными процессами. Обычно наблюдается два сценария развития этих процессов. Первый сценарий — просадки земной поверхности отсутствуют. Скорее всего, это означает, что напряжения накапливаются в массиве горных пород (как правило, карбонатных), слагающих объект. После достижения определенного порога — это может быть либо предел длительной прочности, либо предел усталостной малоцикловой прочности одной из пород разреза — произойдет разрядка накопленных напряжений в виде землетрясения со всеми сопутствующими ему деформационными и социально-экономическими последствиями.

При втором сценарии деформационные процессы на поверхности имеют место (обычно в случае рыхлых терригенных коллекторов), однако их амплитуда не достаточна для того, чтобы вызвать существенные экологические последствия, связанные с изменением рельефа земной поверхности. В этом случае сохраняется негативное влияние концентрации напряжений вблизи скважин, приводящее время от времени к утечкам и прорывам газа за пределы обсадных колонн.

В настоящее время опыта работ по геодинамическому мониторингу месторождений и подземных хранилищ газа очень мало. Практически нет работ длительного (режимного) характера — от начала до поздней стадии разработки месторождений, а тем более эксплуатации ПХГ. Кроме того, следует прямо отметить тот факт, что разработка одних месторождений сопровождается активными аномальными деформационными процессами, а разработка других, даже расположенных в подобной структурно-тектонической зоне, не сопровождается аналогичными процессами [8—10]. Например, в Газли произошло сильное землетрясение, а в районе Ставропольского месторождения его не было.

Северо-Ставропольское подземное хранилище газа является одним из крупнейших и наиболее значимым с экономической точки зрения. Анализ данных о просадках, имевших место на одноименном месторождении, показал, что скорость деформации геологической среды имеет порядок  $0,8...4,0 \cdot 10^{-5}$ /год. В соответствии с действующими "Критериями оценки эко-



логической обстановки территорий", утвержденными Министерством охраны окружающей среды и природных ресурсов в 1992 г. [11], один только факт наличия просадок на более чем 30 % территории оценивается как экологическое бедствие. При охвате просадками от 20 до 30 % территории ситуация оценивается как чрезвычайная экологическая, и только при охвате менее 5 % территории ситуация классифицируется как относительно удовлетворительная (п. 3, табл. 3.4.1.). «Критерии» относят территорию к зоне экологического бедствия при аномальных деформациях  $1 \cdot 10^{-4}$  (п. 4, табл. 3.4.1), причем классифицируются эти события по максимальной накопленной деформации. В анализируемом случае были взяты среднегодовые оценки, что может означать отнесение территории к зоне чрезвычайной экологической ситуации в течение всего периода разработки месторождения с 1957 по 1970 г. И только проведение специальных мониторинговых геодинимических наблюдений позволит дать мотивированную и объективную оценку экологической опасности современных аномальных деформаций поверхности на территории этого объекта.

В Государственной Думе Российской Федерации активно разрабатывается нормативно-правовая база на современное состояние геодинимики недр: законы: "О недрах", "Об экологической экспертизе", "О промышленной безопасности опасных производственных объектов" и др. Поэтому проведение специальных геодинимических исследований в этом направлении позволит получить необходимые данные для успешного прохождения экспертиз геодинимического и экологического рисков, необходимых для выполнения международных проектов по экспорту газа в другие страны [6, 9].

В настоящее время бывшее Северо-Ставропольско-Пелагадинское месторождение работает в режиме подземного хранения газа, выполняя важную роль сохранения огромного количества газа стоимостью порядка нескольких сотен миллионов долларов. В дальнейшем предполагается, что оно будет служить в качестве буферного накопителя газа для обеспечения стабильной работы газопровода «Голубой поток» Россия — Турция. Кроме того, создаются долгосрочные резервы газа, которые могут быть отобраны из хранилища либо непосредственно после осенне-зимнего периода, либо в следующий период отбора даже без летней закачки газа. В определенной мере можно сказать, что на Северо-Ставропольское ПХГ возложена сверхзадача по частичному воссозданию газовых ресурсов экономически развитого региона, каковым является Северный Кавказ, с целью решения стратегических задач энер-

гопользования. И естественно, геодинимическая безопасность подобных объектов — одна из первостепенных потребностей хозяйственной деятельности человека. В свете сказанного необходимо проведение геодинимического мониторинга ПХГ, начиная с рассмотренного выше Северо-Ставропольского хранилища.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Добрынин В.М. Деформации и изменения физических свойств коллекторов нефти и газа. — М.: Недра, 1970. — 239 с.
2. Жуков В.С., Кузьмин Ю.О. Деформация образцов горных пород при физическом моделировании снижения порового давления // Проблемы нефтегазогеологической науки и перспективы развития топливно-энергетического комплекса Туркменистана. — Ашхабад: МНУГ, ИНИГ, Энергетический Фонд, 1996. — С. 135—136.
3. Фуки Б.И., Игнатенко Ю.К. Научное и практическое решение проблемы повышения надежности газоснабжения региона Северного Кавказа путем создания крупных базовых подземных хранилищ природного газа // Докл. на Международной конференции по ПХГ, секция Е. Пленарное заседание конференции. Москва, Россия 11-15 сентября 1995. — 4.1. — С.27—32.
4. Терновой Ю.В., Сергеев В.Н., Гниловской В.Г. О деформации земной поверхности на разрабатываемом Северо-Ставропольском месторождении газа // ДАН СССР. 1965. — № 4, Т. 164. — С.885—888.
5. Кузьмин Ю.О. Современная геодинимика разломных зон осадочных бассейнов // Автореф. дисс. ... докт. физ.-мат. наук — М.: ИФЗ АН СССР, 1990. — 52 с.
6. Кузьмин Ю.О. Современная геодинимика и оценка геодинимического риска при недропользовании // М.: ОИФЗ РАН, АЭН, 1999. — 220 с.
7. Петренко В.И., Ильченко Л.А., Канацук В.Ф. О механизме просадки земной поверхности при добыче жидких и газообразных полезных ископаемых // Советская геология. — 1983. — № 7. — С. 109—115.
8. Кузьмин Ю.О., Никонов А.И. Геодинимическая природа аварийности скважин и трубопроводных систем // Перспективы развития экологического страхования в газовой промышленности. — М.: РАО Газпром, ВНИИ Газ—1998. — С.315—328.
9. Сидоров В.А., Кузьмин Ю.О., Хитров А.М. Концепция "Геодинимическая безопасность освоения углеводородного потенциала недр России" — М.: ИГиРГИ РАН, ИПЦ "Геодинимика и экология", 2000. — 56 с.
10. Кузьмин Ю.О., Никонов А.И. Эколого-геодинимическая опасность подземных хранилищ газа // Информационное обеспечение рационального природопользования.—М.: Единство, 2001. — С. 163—171.
11. Критерии оценки экологической обстановки территорий для выявления зон чрезвычайной экологической ситуации и зон экологического бедствия. — М.: Министерство охраны окружающей среды и природных ресурсов, 1992. — 60 с.

Открытое акционерное общество **"Всероссийский научно-исследовательский институт организации, управления и экономики нефтегазовой промышленности" ОАО "ВНИИОЭНГ"** — головной институт в области экономики, организации, управления, научно-технической информации, маркетинга и рекламы нефтегазовой промышленности ведет отсчет с 1964 г., а с 1992 г. преобразован в акционерное общество

**ЮРИДИЧЕСКИЙ СТАТУС** — Открытое Акционерное Общество

**ФИНАНСОВАЯ ДЕЯТЕЛЬНОСТЬ** — самостоятельная деятельность на принципах полного хозяйственного расчета, самофинансирования и самоокупаемости. Работа по договорам и контрактам с заказчиками научно-технической продукции

**ОРГАНИЗАЦИОННАЯ СТРУКТУРА** — 2 крупных научных подразделения: экономика и информатика, в составе которых 29 лабораторий, аппарат управления и вспомогательные хозяйственные службы

**КАДРЫ** — штат высококвалифицированных научных сотрудников, имеющих опыт научной и производственной работы в отрасли.

9 докторов и 36 кандидатов наук

**ГЕОГРАФИЯ ДЕЛОВОГО СОТРУДНИЧЕСТВА** — Российская федерация, в том числе Западная Сибирь, Сахалин, страны СНГ, ФРГ, Вьетнам

**ПОТРЕБИТЕЛИ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЙ ПРОДУКЦИИ** — Министерство энергетики Российской Федерации; крупные акционерные компании, объединения, предприятия и организации топливно-энергетического комплекса; зарубежные фирмы

ОАО "ВНИИОЭНГ", являясь центральным отраслевым органом научно-технической информации в нефтегазовой промышленности, издает целенаправленную избирательную научно-техническую и научно-экономическую информацию, освещающую современный уровень и тенденции развития науки, техники и технологии, экономики и организации производства, труда и управления во всех областях нефтегазовой промышленности России, стран СНГ и зарубежных стран, а также передовой опыт предприятий и организаций нефтегазовой промышленности.

Институтом ежемесячно издается научно-техническая и научно-экономическая информация для широкого круга специалистов нефтегазовой промышленности и смежных отраслей по следующим направлениям:

1. **Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений.**
2. **Нефтепромысловое дело.**
3. **Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности.**
4. **Строительство нефтяных и газовых скважин на суше и на море.**
5. **Защита окружающей среды в нефтегазовом комплексе.**
6. **Изобретения и рациональные предложения в нефтегазовой промышленности.**

Кроме научно-технических журналов ОАО "ВНИИОЭНГ" выпускает обзоры, книги по нефтяной тематике на хоздоговорной основе. Цена на книги, обзоры и рекламные сообщения, опубликованные на страницах научно-технических журналов — договорная.

**Рекламное оповещение о них будет помещаться в научно-технических журналах и других изданиях института.**

**Справки по телефонам:**

332-00-53

332-00-35

332-00-34

332-00 76

**117420 Москва, ул. Наметкина, 14, корп. Б.**

**Факс: 331-68-77**

**e-mail: vniieng@mcn.ru**

**Internet: http://vniieng.mcn.ru**

**ОАО «ВНИИОЭНГ»** в рамках сотрудничества с редакцией журнала **Journal of Petroleum Geology** проводит **подписку** на этот журнал **на 2003 г.**

Журнал выходит в Великобритании 4 раза в год.

**Подписная цена — 2000 руб.** Бланк-заказ прилагается.

**БЛАНК-  
ЗАКАЗ**

**ОАО «ВНИИОЭНГ»**  
117420, Москва, ул. Наметкина, 14, корп. Б.  
Тел.: (095) 332-00-34, 332-00-29.  
Факс: 332-04-42.

|  |                                |
|--|--------------------------------|
| <b>Организация</b> — получатель<br>(Полное наименование предприятия) |                                |
| <b>Название журнала и кол-во экземпляров</b>                         | «Journal of Petroleum Geology» |
| <b>Почтовый адрес получателя</b><br>(с указанием индекса)            |                                |
| <b>Идентификационный номер<br/>налогоплательщика (ИНН)</b>           |                                |
| <b>Телефон, факс, e-mail</b>   |                                |

Стоимость заказа в сумме 2000 руб., включая НДС, перечислена на расчетный счет ОАО «ВНИИОЭНГ».

**р/счет** 40702810738030101112,  
**кор. счет** 30101810400000000225,  
**Банк** Сбербанк России г. Москва  
Донское отделение № 7813  
**БИК** 044525225,  
**ИНН** 7728011018,  
**ОКОНХ** 95120,  
**ОКПО** 00147051,  
**платежным поручением (почтовым переводом).**

№ \_\_\_\_\_ от " \_\_\_\_\_ " \_\_\_\_\_ 200\_\_ г.