

## Экологическая и инженерная геофизика

### Моделирование обратной задачи просадки поверхности для улучшения понимания строения недр Земли. Inverse modelling of surface subsidence to better understand the Earth's subsurface

Peter A. Fokker,<sup>1,2</sup> Annemarie G. Muntendam-Bos,<sup>2</sup> и Ingrid C. Kroon<sup>2</sup> демонстрируют, что с использованием тщательно разработанной схемы инверсии, можно ввести количественные ограничения в имеющиеся данные о геологии и динамике коллектора на основании наблюдений просадки.

Просадка поверхности может иметь значительные последствия. Классическим примером является морское дно над месторождением Ekofisk, на акватории Норвегии, там, где избыточная просадка привела к необходимости поднятия буровой платформы на 6 м в 1980х. В наземных условиях, просадка может существенно увеличить риск повреждения построек и инфраструктуры. Но, о просадке необходимо сказать подробнее. Наблюдения за просадкой также могут дать нам лучшее понимание процессов в недрах, таких как поведение коллектора при сжатии, и могут рассказать нам больше о самом коллекторе: о неосушенных отделениях коллектора или сопротивлении водоносных горизонтов. Однако, для получения информации из данных о просадке, необходимо тщательно проводить процедуру инверсии. Выполнение инверсии – огромная задача, при выполнении которой необходимо использовать все имеющиеся знания в наибольшем объеме. В данной статье мы сообщаем о работе, недавно проведенной в данной области.

#### Методология

Теории, основанные на законах физики, позволяют нам делать предсказания: при заданном полном описании физической системы, мы можем предсказывать какие значения могут быть получены в результате некоторых измерений. Эта задача часто называется прямой задачей. Обратная задача состоит в использовании измерений для получения значения параметров, характеризующих систему. Mencke (1989) и Tarantola (2005) описывают значения и теории моделирования обратной задачи в деталях. В обратной задаче, измерениями являются данные о просадке. Для получения параметров модели, мы рассматриваем как глубинные, так и малоглубинные причины просадки: сжатие коллектора, давление в коллекторе, уровень грунтовых вод, и степень окисления малоглубинных торфяников. Нашей целью является выделение и количественная оценка глубинных и малоглубинных причин просадки в процедуре с временным разрешением.

Для того чтобы была возможность произвести оценку параметра обращения в целях выявления глубинных и малоглубинных причин просадки поверхности, необходимо задать прямое соотношение между каждым процессом и получаемым погружением поверхности. Малоглубинное сжатие может быть вызвано просадкой артезианского напора и/или уровня грунтовых вод (например Schothorst, 1979; Schmidt and Burgmann, 2003). В нашей работе, мы используем удобный и быстрый для расчетов 1D подход, который описывает сжатие эмпирически (детали смотрите в Bremmer et al.,

2003). Окисление торфяников моделируется путем использования постоянной скорости окисления для сухих торфяников, которое учитывает получающееся уменьшение мощности окисленных сухих торфяников со временем. Переход сжатия слоев и окисления торфяников к просадке поверхности считается событием мгновенным и в основном, локальной значимости (Рис. 1).

Причиной того, что эксплуатация углеводородов вызывает просадку грунта и морского дна, является то, что уменьшение давления вызывает сжатие коллектора. Вследствие упругих свойств покрывающих пород, сжатие коллектора передается на поверхность практически мгновенно. Хотя, ввиду того, что разрез упругий, просадка развивается на большей области, чем область сжатия коллектора. Область, затронутая процессом, практически такая же, как глубина коллектора (Рис. 1). Таким образом, просадка в каждой точке является результатом сжатия в огромной области коллектора. Мы использовали подход функции влияния или функции Грина для построения прямого моделирования, которое описывает данный процесс (детали смотрите Fokker and Orlic, 2006).

Прямое соотношение между глубинным и малоглубинным сжатием с одной стороны и просадкой поверхности, с другой стороны, можно объединить в векторно-матричное уравнение  $d=Gm$ , где  $G$  представляет собой прямую модель,  $m$  – параметры модели (сжатие) и  $d$  – наблюдения по просадке поверхности. Простая инверсия этого уравнения, однако, не всегда

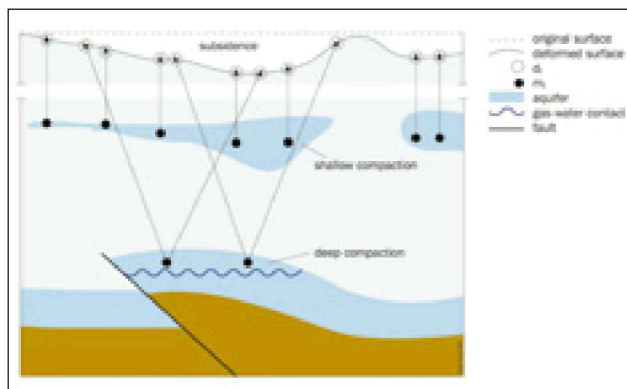


Рисунок 1 Схема причин малоглубинного и глубинного уплотнения ( $m$ ), которые ведут к просадке поверхности ( $d$ ). Стрелками отмечена область, влияющая на отдельные источники уплотнения.

<sup>1</sup> E-mail: peter.fokker@tno.nl.

<sup>2</sup> TNO Built Environment and Geosciences, Utrecht, The Netherlands.

## Экологическая и инженерная геофизика

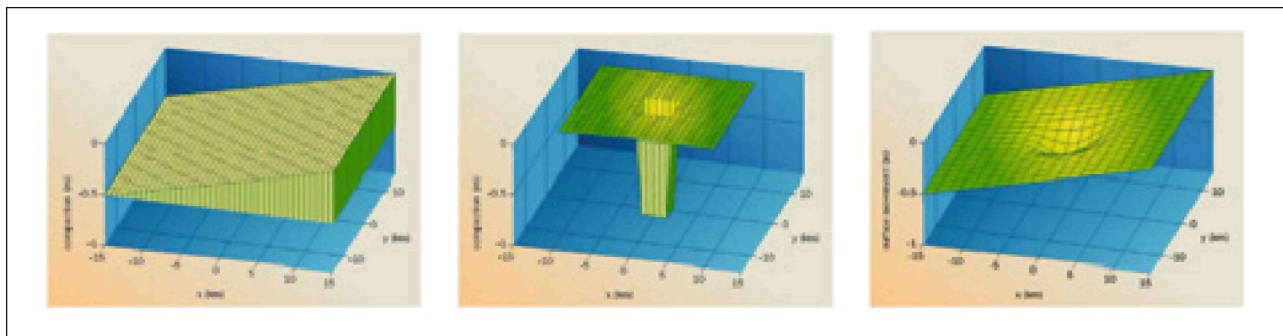


Рисунок 2 Синтетическая модель: (а) Малоуглубленное сжатие увеличивается линейно от 0 см на восточной границе до 50 см на западной границе. (б) Глубинное сжатие от 1 м в пределах прямоугольного коллектора. (с) Получаемая оценка просадки поверхности.

дает осмысленный результат, поскольку решение обратной задачи может быть не единственно, или небольшие вариации в измерениях могут вызывать большие вариации в модели. Таким образом, мы приняли процедуру инверсии, которая учитывает все доступные знания – не только данные по наблюдаемой просадке. Эти данные совмещаются в априорной модели ( $m_0$ ), матрице ковариации априорной модели ( $C$ ) и матрице ковариации данных ( $C_d$ ). Диагональные элементы в  $C_m$  и  $C_d$  представляют собой отклонение (квадратичную ошибку) модели и данных; ненулевые недиагональные элементы (ковариации) являются численной оценкой ожидаемых пространственных и временных соотношений между блоками сетки (в  $C_m$ ) и между точками наблюдения (в  $C_d$ ).

Поскольку временная зависимость явно входит в

задачу инверсии, метод может справляться с большим числом точек, добавляемых при наблюдениях более поздних съемок, и также с тем, что все точки не обязательно включать в каждую съемку. Новые включенные точки будут обрабатываться тем же способом, что и все другие точки данных со времени первого наблюдения и далее. Для каждой точки, которая отсутствует в одной или более съемок, разность между измерениями во время съемок, и следующей съемкой вслед за пропуском в измерениях, разбрасывается на все промежуточные модели. Это обеспечивает то, чтобы все имеющиеся данные и априорная информация о модели строения разреза использовались оптимально.

### Неучтенные причины просадки

Для того чтобы показать, как взаимодействуют между собой глубинные и малоуглубинные причины просадки, мы построили статическую синтетическую модель,

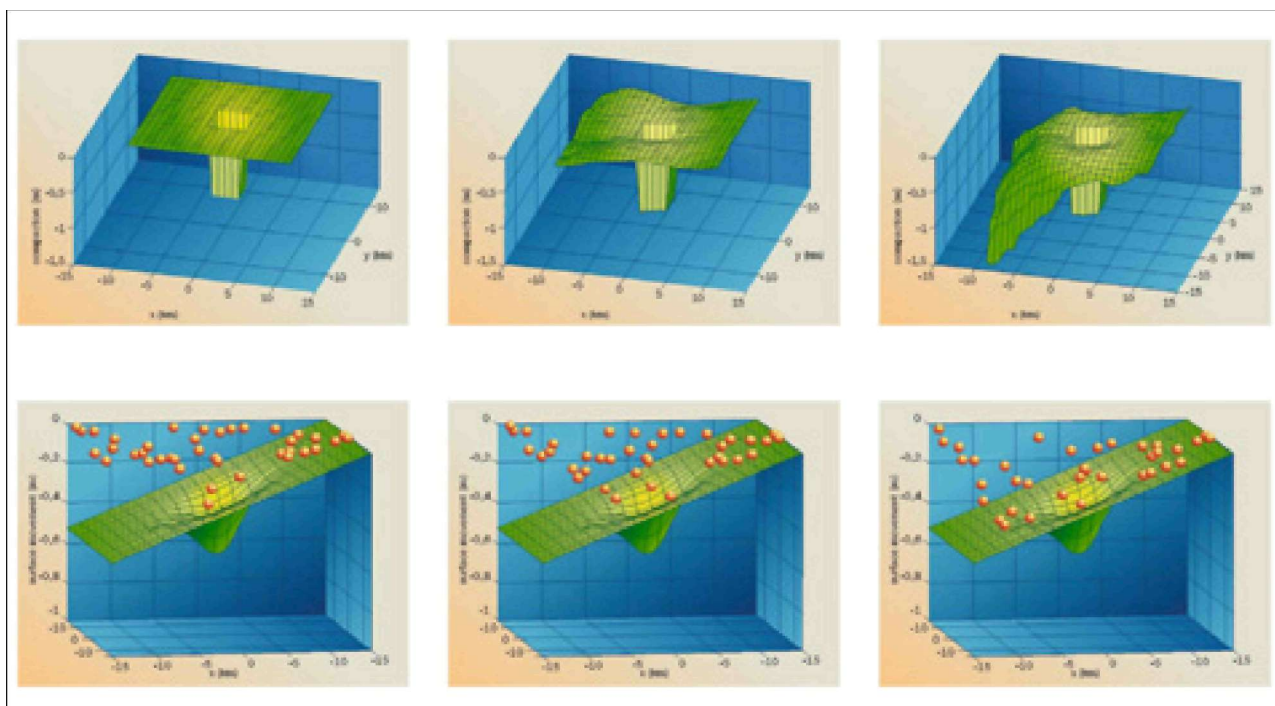


Рисунок 3 Оценочная модель и соответствующая просадка поверхности для инверсии, в предположении только глубинного сжатия с погрешностью (а) 0.1 м, (б) 0.32 м, и (с) 1 м. Для сравнения показана исходная сетка просадки.

## Экологическая и инженерная геофизика

включающую оба случая (Kroon et al., 2006). Ранее заданная сетка малоглубинного сжатия (Рис. 2a) представляет собой идеальный слой торфяника, выклинивающегося в восточном направлении на самой восточной границе. Априорная заданная сетка глубинного сжатия (Рис. 2b) представляет собой идеальный газовый коллектор прямоугольной формы с резкими границами (Рис. 2c) и является комбинацией малоглубинного тренда по линии восток-запад и чаши просадки, соответствующего глубинному сжатию. Инверсия основана на 40 точках данных рассчитанной сетки просадки поверхности, к которой было добавлено 10% случайного шума. Путем использования синтетических данных мы избегаем ошибок в неявных предположениях (например ошибки измерений и синхронизации, согласованности опорных данных и ошибки стабильности, ошибки интерполяции и экстраполяции, и ошибки позиционирования) в нашем анализе. Правильное определение этих ошибок является само предметом исследований (e.g. Kenselaar, 2001; Houtenbos et al., 2005) и будет рассматриваться в будущих полевых работах.

Мы показали важность правильной параметризации модели с помощью использования примера, в котором ошибочно пренебрегают

малоглубинным сжатием. Мы используем три случая, в которых априорная модель ( $m_0$ ) соответствует реальной модели глубинного сжатия и различной степени погрешности модели (0.1 м, 0.32 м, и 1 м, соответственно). В зависимости от достоверности, которую мы приписываем начальной модели глубинного сжатия, существенно колеблется либо оцененная просадка по сравнению с наблюдаемой просадкой (Рис. 3a), либо значительно модифицируется начальная модель (Рис. 3c). Без учета глубинного сжатия в исследовании случай малоглубинной просадки поверхности характеризуется простым результатом. Очевидно, что нельзя пренебрегать глубинными и малоглубинными процессами при оценке просадки поверхности; в противном случае, модели будут содержать ошибки или будут большие невязки с (локальными) данными. Правильное использование всех имеющихся данных помогает идентифицировать и оценивать реальные случаи наблюдаемой просадки.

### Динамическое сжатие коллектора со временем

Мы также применили описанный выше метод к построению синтетической модели коллектора. Мы сделали это с целью выделения сильных сторон при учете всех физических зависимостей между блоками сетки

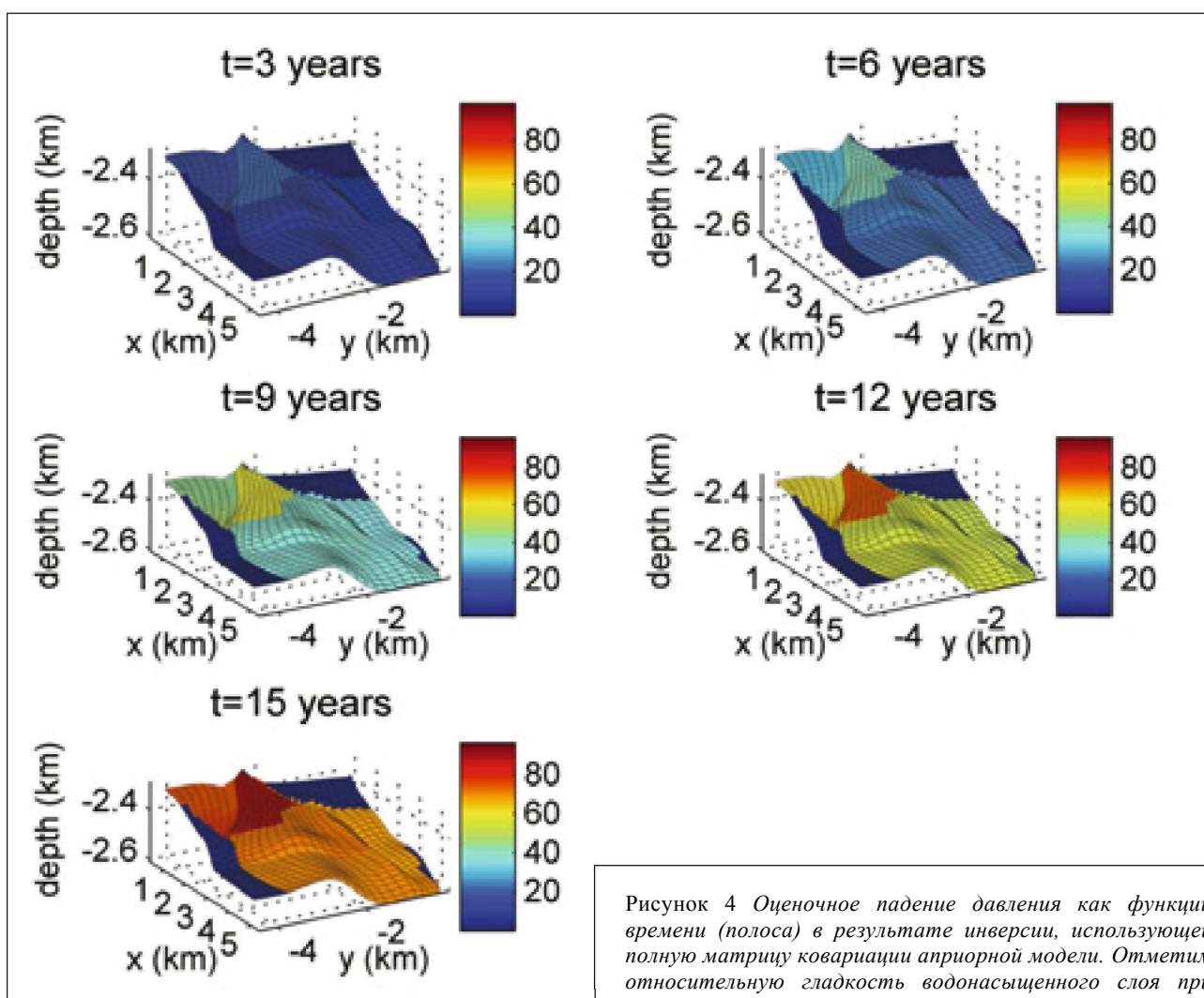


Рисунок 4 Оценочное падение давления как функции времени (полоса) в результате инверсии, использующей полную матрицу ковариации априорной модели. Отметим относительную гладкость водонасыщенного слоя при резком контакте газ/вода и разломах.



## Экологическая и инженерная геофизика

в пространстве и во времени посредством матрицы ковариации модели, и зависимости во времени в нашей процедуре инверсии. Наша синтетическая модель коллектора основана на реальном газовом месторождении в северной части Нидерландов, и адаптирована для получения значительной величины просадки. Имеющаяся геологическая информация (т.е. объем и глубина коллектора, форма, наличие разломов, проницаемость, пористость, и тип покрывающих пород) и не погрешность проницаемости на границе газ/вода были объединены с информацией о добыче в программе моделирования коллектора. Таким образом, было построено поле снижения давления и реалистичная ковариация, которые использовались в качестве априорной информации в процедуре инверсии (детали смотрите в Muntendam et al., 2007). Данные о просадке  $d$  были построены с использованием 'истинных' геологических входных данных. Было отобрано 50 случайных точек для обеспечения реалистичного подбора информации о просадке.

На рис. 4 показана оценочная модель по данным инверсии с использованием априорной модели полной матрицы ковариации. Помимо резкой свободной границы воды и разломов, оценочная модель - гладкая, учитывая то, что в качестве ограничений нет условий гладкости.

Эта гладкость достигается благодаря недиагональным элементам матрицы ковариации, которые являются численной оценкой ожидаемых соотношений между падением давления в блоках сетки, как во времени, так и в пространстве. Результатом является то, что на каждое изменение модели блока сетки, обусловленное данными просадки, также влияет оценка модели для всех других блоков сетки, с которой он делит ненулевую ковариацию. Таким образом, особая геологическая информация стимулирует 'гладкий' отклик водоносного горизонта, при этом сохраняя резкую свободную границу воды.

Разность между 'истинным' падением давления ( $m_0$ ) и оценочным падением ( $m$ ) показана на Рис. 5. Априорная модель была существенно изменена. Снижение давления водоносной части коллектора в априорной модели было существенно скорректировано. При данных оценках ошибки, полученных по нашей инверсии ( $\epsilon_{\max} \sim 12$  бар), ясно, что изменение априорной модели, полученное с помощью нашего нового метода существенно и данные значительно повлияли на изменение модели. Итак, соотношение, которое содержится в априорной модели

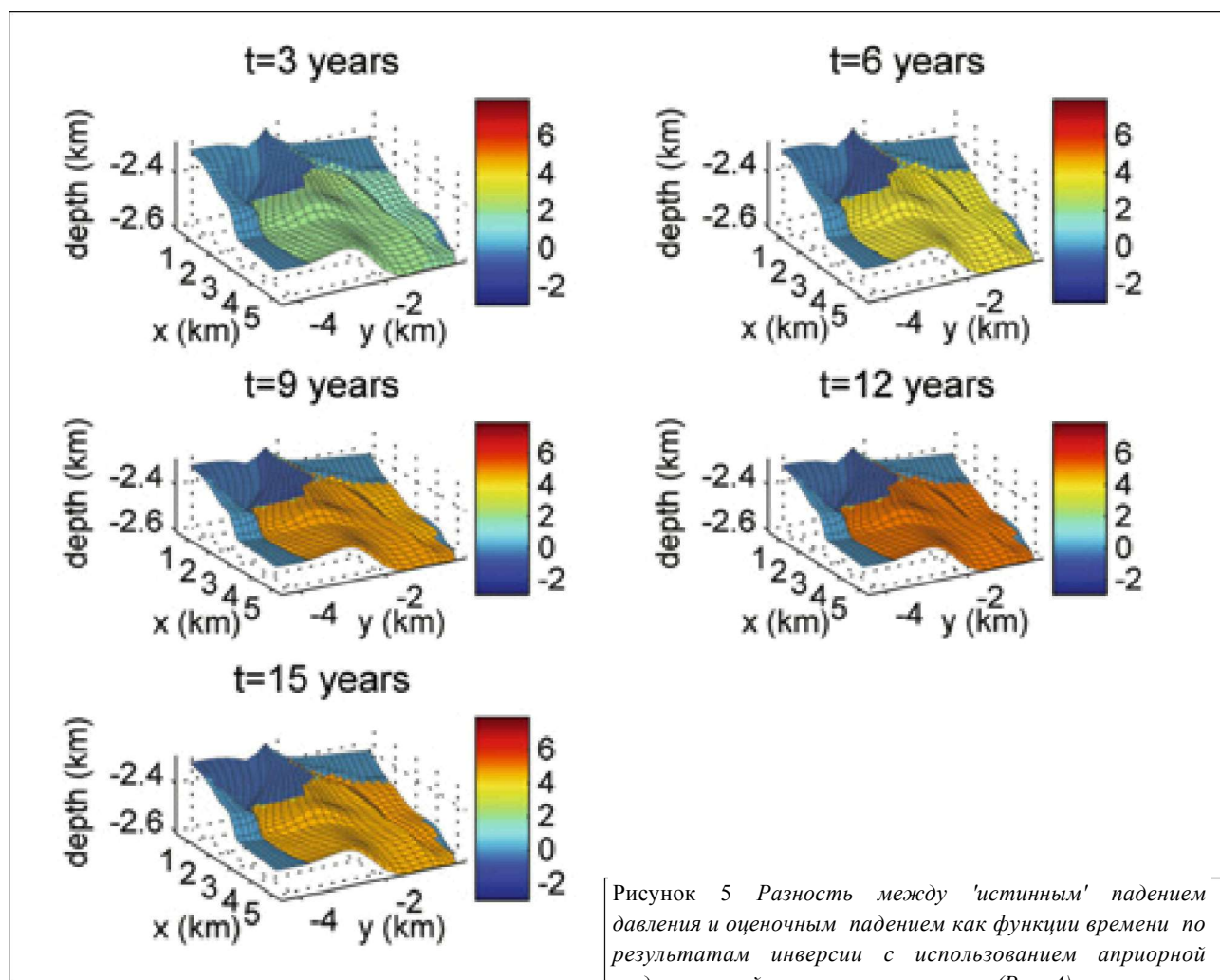
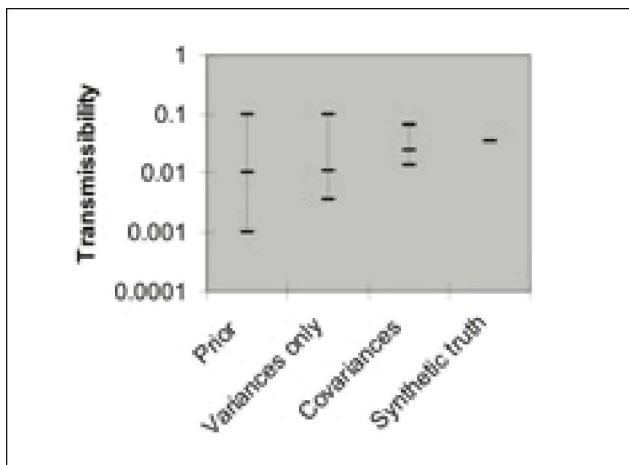


Рисунок 5 Разность между 'истинным' падением давления и оценочным падением как функции времени по результатам инверсии с использованием априорной модели полной матрицы ковариации (Рис. 4).

## Экологическая и инженерная геофизика



**Рисунок 6** Ожидаемые значения проницаемости на газо-водяном контакте. Большая априорная неопределенность скрывается в геологической информации. Нижняя граница была скорректирована с помощью инверсии только на основе отклонения, но существенное изменение ожидаемого значения было достигнуто путем использования полной матрицы ковариации, которая содержит информацию о корреляции между параметрами модели. Отметим, что ось Y в логарифмическом масштабе.

ковариации, диктует, что, несмотря на относительно небольшое количество имеющихся данных, оценка модели была модифицирована в сторону 'истинной' модели.

Для более явной иллюстрации этого характеристического влияния ковариации априорной модели, мы инвертировали те же данные тем же методом, но с использованием только отклонения модели, которое задается диагональными элементами матрицы ковариации нашей априорной модели. Это наиболее распространенный способ моделирования обратной задачи. Получаемая оценочная модель отклоняется только на небольшие величины от априорной модели, что говорит о том, что процедура инверсии наталкивается на слишком малое число ограничений, чтобы гарантировать изменение априорной модели. Это подчеркивает важность включения геологической информации в явном виде как в  $m_0$  так и во временные/пространственные соотношения между элементами сетки (недиагональные элементы  $C_m$ ).

Результаты инверсии с временным разрешением приводятся на Рис. 6. На этом рисунке показана проницаемость, которая вызывает скачок давления на границе газ/вода. Применение процедуры инверсии, но с использованием только отклонения несущественно изменяет проницаемость априорной модели, тогда когда при применении ковариации, результатом является существенная адаптация в сторону 'истинного' синтетического коллектора. Таким образом, тщательная инверсия, с использованием всей имеющейся информации, улучшает наше понимание геологии.

### Выводы

Схема интегрированной инверсии зависящей от времени, которую мы разработали, использует всю доступную информацию для обеспечения

лучшей оценки параметров модели разреза. Процедура выявляет как пространственные, так и временные аспекты малоглубинных и глубинных причин просадки поверхности за одну процедуру инверсии. Проблема, связанная с подобным типом инверсии обычно заключается в неединственности решения и его чувствительности к небольшим изменениям в измерениях. Поэтому требуются дополнительные ограничения для регуляризации. Они берутся из априорной информации. В первом представленном здесь примере, мы продемонстрировали, что априорные знания в виде корректной параметризации модели принципиальны для получения надежного результата. Второй пример демонстрирует существенное возрастание значимости результатов при учете пространственных и временных корреляций, полученных из геологической информации и данных о технологии разработки пласта. Используя тщательно продуманную схему инверсии, доступные геологические и динамические данные по коллектору могут послужить в качестве количественных ограничений при наблюдениях за просадкой.

### Литература

- Bremmer, C.N., Lange, G. de, Linden, W. van der, Veling, E., and Veldkamp, J.G. [2003] Bodemdaling en Integraal Waterbeheer: Eindrapport Delft Cluster Project 06.03.02, TNO-NITG report, 03-200-A.
- Houtenbos, A.P.E.M., Hounjet, M.W.A., and Barends, F.B.J. [2005] Subsidence from geodetic measurements in the Ravenna area. In: *Land Subsidence; Proceedings of the seventh international symposium on land subsidence*, Shanghai, P.R. China, 23-28 October, special volume, 79-99.
- Fokker, P.A. and Orlic, B. [2006] Semi-analytic modeling of subsidence. *Mathematical Geology*, 38, 565-589.
- Kenselaar, F. [2001] A testing procedure for subsidence analysis. In: *Proceedings of the 10th FIG international symposium on deformation measurements*, Orange California.
- Kroon, I.C., Nguyen, B.-L., and Fokker, P.A. [2006] Disentangling shallow and deep processes causing surface movement. Submitted to *Mathematical Geology*.
- Mencke, W. [1989] Geophysical Data Analysis: Discrete Inverse Theory. *Int. Geophysics Series*, 45, Academic Press, San Diego, California, revised edition, 289 pp.
- Muntendam-Bos, A.G., Kroon, I.C., and Fokker, P.A. [2007] Time-dependent inversion of surface subsidence due to dynamic reservoir compaction. Submitted to *Mathematical Geology*.
- Schmidt, D.A. and Biirgmann, R. [2003] Time-dependent land uplift and subsidence in the Santa Clara valley, California, from a large interferometric synthetic aperture radar data set. *J. Geophys. Res.*, 108(B9), 2416, doi: 10.1029/2002JB002267.
- Schothorst, C.J. [1979] Subsidence of low moor peat soils in the western Netherlands. *Geoderma*, 17, 265-291.
- Tarantola, A. [2005] Inverse Problem Theory and methods for model parameter estimation. *SIAM*, Philadelphia, 342 pp.