

УДК 528.02:551.2/.3:553.9

DOI: 10.33764/2411-1759-2020-25-1-43-54

## АКТУАЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГЕОДЕЗИЧЕСКИХ ИЗМЕРЕНИЙ ПРИ ГЕОДИНАМИЧЕСКОМ МОНИТОРИНГЕ ОБЪЕКТОВ НЕФТЕГАЗОВОГО КОМПЛЕКСА

*Юрий Олегович Кузьмин*

Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук (ИФЗ РАН), 123242, Россия, г. Москва, Большая Грузинская ул., 10, стр. 1, доктор физико-математических наук, профессор, заведующий отделением разведочной геофизики и прикладной геодинамики, тел. (499)254-65-65, e-mail: kuzmin@ifz.ru

Обсуждаются актуальные проблемы, которые возникают при проектировании и анализе результатов повторных маркшейдерско-геодезических наблюдений за современным геодинамическим состоянием горных отводов месторождений углеводородного сырья и подземных хранилищ газа. Обзор большого массива данных показывает, что существуют две основные формы аномальных деформаций земной поверхности, обусловленные эксплуатацией нефтегазовых объектов – обширные просадки территории месторождений и локальные деформации разломных зон.

Приведены результаты математического моделирования формирования деформаций земной поверхности, вызванных разработкой месторождений и показано, что максимальные амплитуды вертикальных смещений земной поверхности сосредоточены в центральной части месторождений, а максимумы горизонтальных – на периферийной части. Установлено, что влияние земной поверхности, свободной от напряжений, приводит к тому, что амплитуды вертикальных смещений, при прочих равных условиях, всегда преобладают над горизонтальными, которые формируются в условиях горизонтального стеснения со стороны окружающих горных пород. На основе разработанной модели построено распределение градиентов вертикальных (наклоны) и горизонтальных (относительные деформации) смещений земной поверхности, которые сопоставлены с критическими (нормативными) значениями.

Продемонстрированы объективные ограничения, которые возникают при сопоставлении результатов наблюдений, полученных методами спутниковой и наземной геодезии и, в частности, с помощью спутниковой радарной интерферометрии. Предлагаются конкретные решения и схемы построения системы геодинамических наблюдений и оптимальный регламент проведения геодинамического мониторинга месторождений для обеспечения промышленной безопасности объектов инфраструктуры.

**Ключевые слова:** моделирование, деформации земной поверхности, градиенты смещений, спутниковая радарная интерферометрия, геодезические измерения, геодинамический мониторинг, месторождения нефти и газа.

### *Введение*

Как известно, в соответствии с п. 263 «Инструкции по производству маркшейдерских работ» (РД 07-603-03) [1] проектную документацию на создание системы наблюдений (геодинамического полигона) на месторождениях нефти и газа составляют на основе горно-геологического обоснования, в которое включают: «количественную оценку горизонтальной и вертикальной составляющих векторов движения, величин, характеризующих деформации массива горных пород и земной поверхности, скорости изменения этих величин».

Естественно, что измерения этих величин должны осуществляться комплексом наземных и спутниковых геодезических измерений. Однако в Инструкции не обозначены необходимые требования ни к составу методов наблюдений, ни к их метрологическим характеристикам, ни к необходимой частоте опроса. Единственное нормативное требование к системе наблюдений заключается только в определении необходимой густоты измеряемых пунктов. В пределах месторождений расстояние между реперами должно быть не более 300–500 м, а в зонах разломов не должно превышать 100 м.

В этой ситуации единственной возможностью определения рационального комплекса конкретных методов наблюдений и оптимального регламента наблюдений является анализ основных пространственно-временных характеристик деформаций земной поверхности, возникающих при разработке месторождений углеводородов (УВ).

На основе проведенного обзора большого массива данных показано, что существуют две основные формы аномальных деформаций земной поверхности, обусловленные эксплуатацией нефтегазовых объектах – обширные просадки территории месторождений и локальные деформации разломных зон [2]. При этом установлено, что обширные оседания земной поверхности фиксируются не на всех месторождениях, а деформационная активизация разломов происходит повсеместно и преимущественно в форме локальных оседаний поверхности.

В данной работе предлагается в качестве дополнительного критерия оценки эффективности применяемых геодезических методов в системе геодинимического мониторинга и особенно для определения оптимальной конфигурации измерительной сети использовать результаты математического моделирования формирования деформационного состояния недр месторождений УВ при их разработке.

### ***Моделирование деформационных последствий разработки месторождений УВ***

К настоящему времени имеется ряд моделей формирования оседаний земной поверхности, который условно можно разделить на три группы. К первой группе относятся полуаналитические (инженерные) модели. Ярким примером служит модель Гиртсма [3]. В ней используется эмпирический коэффициент уплотнения, который был получен по экспериментальным данным, путем многочисленных испытаний кернового материала в условиях одноосного сжатия. Он является аналогом коэффициента сжимаемости порового пространства –  $\beta$ , что подробно проанализировано в работе [4]. Значение этого эмпирического коэффициента выбирается в зависимости от пористости и минералогического состава горных пород. В этой модели предполагается что оседание земной поверхности полностью обусловлено сжимаемостью самого пласта. Однако в ре-

альности, помимо разрабатываемого пласта, деформируется и окружающий массив горных пород, включая вышележащую толщу.

Вторая группа – это аналитические модели, где процесс деформации затрагивает всю толщу, включая окрестности продуктивного пласта. Наибольшее распространение получила так называемая, модель деформируемого пласта Кузьмина – Черныха [2, 5]. В ней получены формулы для вертикальных и горизонтальных смещений поверхности упругого полупространства, внутри которого помещен объект правильной геометрической формы (сфера, цилиндр, прямоугольный параллелепипед и т. д.). В этой модели используется теория деформационных ядер, основанная на применении функций Грина [6]. В дальнейшем усовершенствовании этой модели был учтен эффект весомости среды и генезис образования залежи. Оценки показали, что добавочные дополнительные оседания за счет влияния веса пласта достигают 15–20 %. Кроме того, была учтена генетическая составляющая.

Как правило, месторождения – это структуры антиклинального типа, т. е. изгиб вышележащей над залежью толщи пород. Генетическая поправка учитывает то силовое воздействие, которое сформировало саму залежь. Таким образом, возникает баланс трех факторов, формирующих итоговое оседание: падение пластового давления, которое уменьшает объем пласта и приводит к оседаниям поверхности, вес вышележащей (над пластом) толщи, который добавляет оседания, генетический фактор, т. е. действующие вверх силы, которые сформировали эту антиклинальную залежь и уменьшают оседания [4]. Конкуренция этих трех сил и приводит к формированию окончательной амплитуды оседания земной поверхности при разработке месторождения. Здесь важно отметить, что наличие аналитических моделей позволяет создавать гибридные (численно-аналитические) модели, когда, используя принцип суперпозиции решений от призматических элементов различного размера, можно моделировать пластовые условия со сложной геологической структурой.

К третьей группе относится ряд численных моделей, которые, в отличие от аналитических, могут, применяя методы конечных или граничных элементов, позволяют учитывать более сложную геометрию пласта, разбивая его тем самым на отдельные элементы. Применительно к оценке оседаний нефтегазовых месторождений, наиболее разработанной моделью является «шатровая», конечно-элементная модель Кашникова – Ашихмина [7], которая успешно применялась на ряде месторождений.

При этом необходимо отметить, что при разбиении продуктивного пласта и вмещающей толщи на большое количество «кубиков», ввиду дефицита исходной геолого-промысловой информации, приходится использовать в качестве заполнения этих кубиков некое среднее значение коэффициентов пористости, сжимаемости и т. д. Этот факт является существенным ограничением численных моделей при их использовании для анализа смещений и их затуханий с расстоянием. Особенно остро стоит вопрос с дефицитом данных по определе-

нию коэффициентов поровой сжимаемости. Этот показатель определяется из петрофизического анализа кернов горных пород, отобранных в скважинах. А такие скважины на всем месторождении исчисляются, как правило, единицами даже для крупных нефтегазовых объектов. Так как коэффициент сжимаемости порового (трещинного) пространства является одним из наиболее ключевых параметров для оценки оседания земной поверхности, то по сути, несмотря на детализацию геометрии пласта, исследователь при конечно-элементной реализации приходит к некой неоднородной по строению, но однородной по деформационным свойствам продуктивного пласта (пластов) – коллектора, геомеханической модели месторождения. Важно отметить, что, например, градиенты смещений в этой модели приходится вычислять в каждом конкретном конечном элементе, а затем суммировать их по всему пласту, что также является не совсем корректной процедурой [8, 9].

Поэтому, когда необходимо проанализировать тектонофизические закономерности формирования процесса оседания земной поверхности и, особенно, распределение градиентов смещений, то целесообразно использовать генетическую модель деформируемого пласта. Эта модель была неоднократно апробирована на ряде месторождений (включая шельфовые) и подземных хранилищах газа, где расчетные смещения были напрямую сопоставлены с результатами маркшейдерско-геодезического мониторинга [10–14].

На рис. 1 представлен трехмерный вариант реализации этой модели, на примере одного газоконденсатного месторождения:  $2a = 30$  км,  $2b = 45$  км,  $d_1 = 3,944$  м,  $d_2 = 4,056$  м. Распределения вертикальных смещений земной поверхности от этого пласта построены при изменении пластового давления  $\Delta P = 11$  МПа, коэффициенте сжимаемости порового пространства  $\beta = 0,001$  и величине коэффициента пористости  $m = 0,17$ . Максимальная амплитуда оседания наблюдается в точке (0,0) и равна 1,055 м.

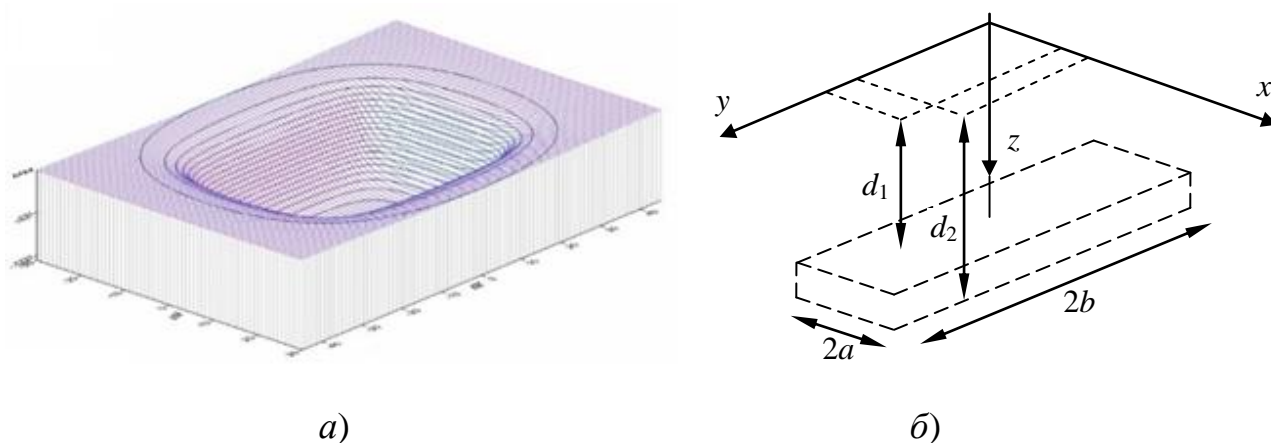


Рис. 1. Объемная модель обширных просадок земной поверхности в окрестности разрабатываемого пласта:  
 а) распределение оседаний; б) геометрические характеристики модели пласта

В формулах, которые использованы при расчетах, величины смещений определены как произведение «физического» и «геометрического» сомножителей. «Геометрический» описывает пространственное распределение параметров. «Физический» сомножитель имеет вид:

$$\Phi = m \cdot \beta \cdot \Delta P,$$

где  $m$  – коэффициент пористости;  $\beta$  – коэффициент сжимаемости порового пространства;  $\Delta P$  – изменение пластового давления.

На рис. 2 показано сопоставление вертикальных и горизонтальных смещений в рамках 3D-модели. Из рисунка видно, что в центральной части пласта (месторождения) вертикальные смещения максимальны, а горизонтальные смещения равны нулю. Максимумы горизонтальных смещений равны 0,730 м и сосредоточены на краях пласта, который отмечен черным пунктиром.

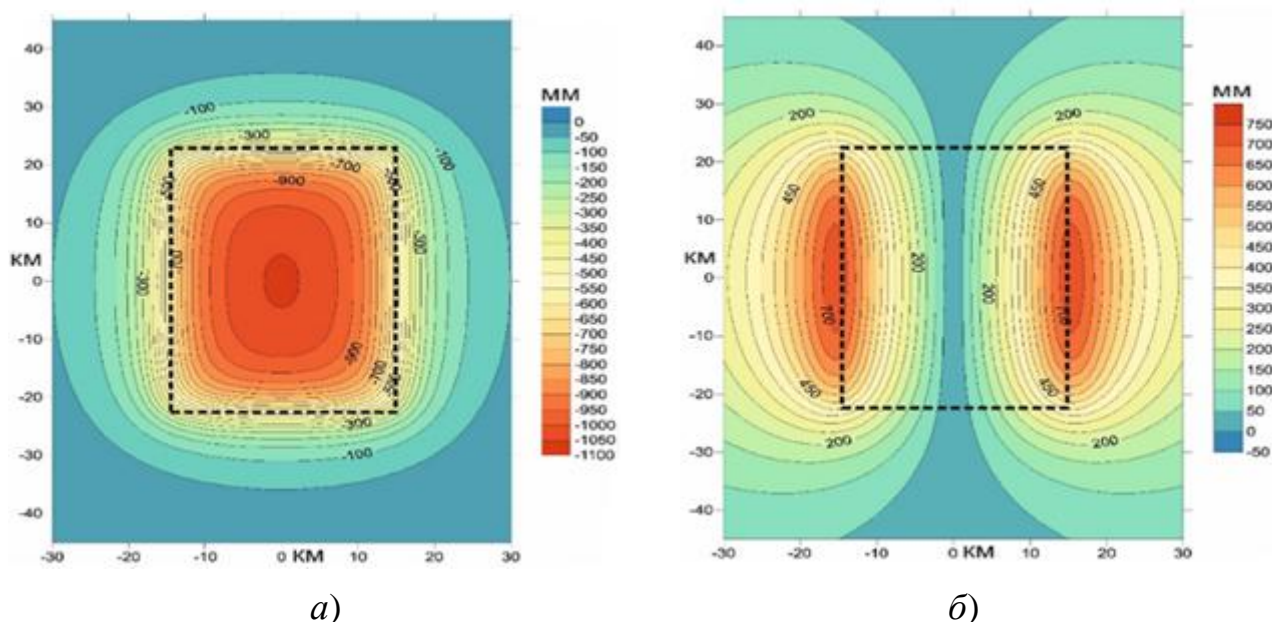


Рис. 2. Площадное распределение смещений поверхности для объемной модели пласта:

*а)* площадное распределение вертикальных смещений; *б)* площадное распределение горизонтальных смещений

Предложенную модель можно использовать и для моделирования деформационной активности разломных зон. Для этого необходимо использовать другие соотношения между размерами призматического элемента – модельного аналога разломной зоны. Для случая разломной зоны длина  $2b$  и высота  $(d_2 - d_1)$  пласта должна быть, естественно, намного больше его ширины  $2a$ . При этом «физический» сомножитель определяется также комбинацией пороупругих коэффициентов и величиной изменения пластового давления [15].



Для того, чтобы оценивать уровень промышленной опасности (потенциальной аварийности) объектов инфраструктуры месторождений УВ на геодинамической основе, необходимо сопоставлять результаты измерений с нормативными показателями предельно-допустимых (опасных) деформаций различного типа, а эти показатели, в большинстве случаев выражаются в виде относительных деформаций [16–18]. В соответствии с рядом нормативных документов (СП 11-104–97; СП 22.13330.2016 и др.) [19, 20] предельно допустимые, за весь период эксплуатации сооружений, деформации не должны превышать: относительное горизонтальное сжатие или растяжение –  $10^{-3}$ , наклон –  $3 \cdot 10^{-3}$ , относительная неравномерность осадок земной поверхности –  $6 \cdot 10^{-3}$ . Естественно, что эти величины математически выражаются в форме горизонтальных градиентов горизонтальных или вертикальных смещений, соответственно.

Красным цветом на рис. 3 показаны максимальные области значений градиентов смещений. Видно, что предельные наклоны достигают величин порядка  $10^{-4}$ , а максимальные значения относительных горизонтальных деформаций –  $0,6 \cdot 10^{-3}$ . Стоит заметить, что эти максимальные значения снова сосредоточены на границах пласта. Этого и следовало ожидать, поскольку, когда речь идет о градиентах, то они всегда имеют наибольшие значения в местах наибольшего перепада распределения величин.

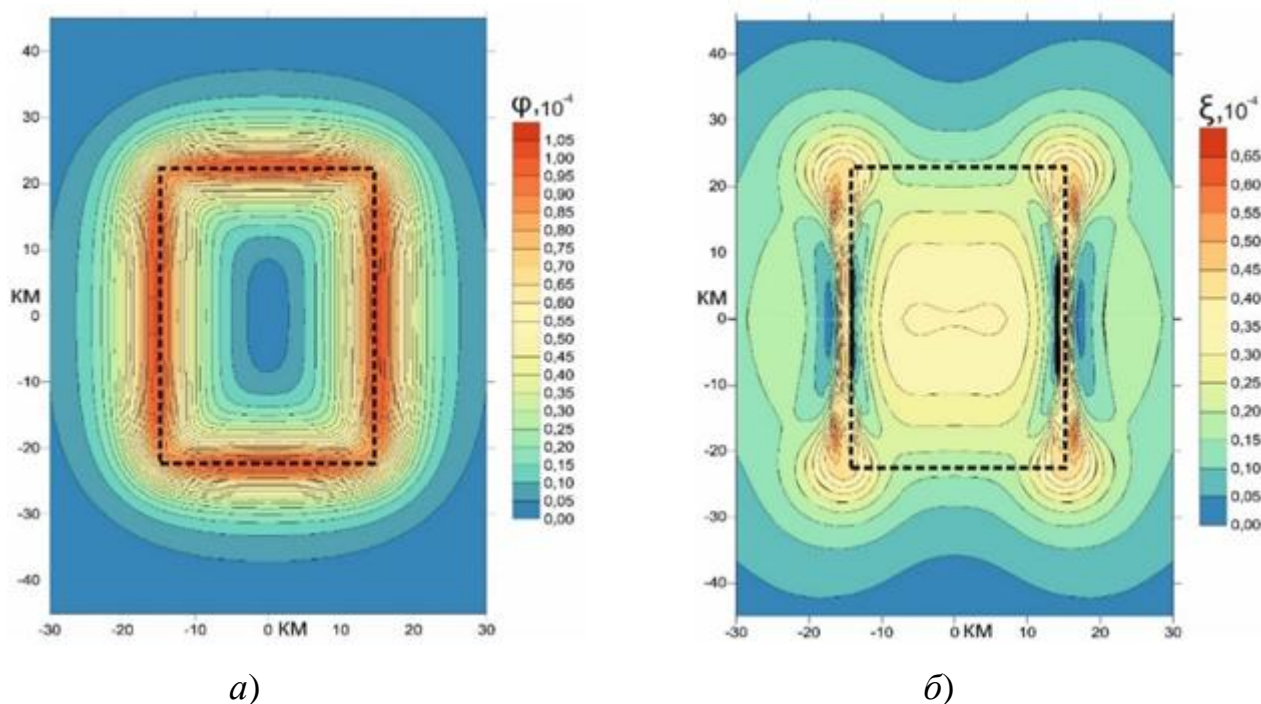


Рис. 3. Распределение градиентов смещений поверхности для объемной модели пласта:

*a)* пространственное распределение наклонов  $\varphi$ ; *б)* пространственное распределение горизонтальных деформаций  $\xi$

### **Оптимальная конфигурация системы геодезических наблюдений**

Из приведенных распределений вертикальных и горизонтальных смещений, а также их градиентов следует важный вывод. Методы, регистрирующие горизонтальную компоненту смещений земной поверхности, следует использовать таким образом, чтобы пункты наблюдений располагались ближе к периферии месторождений, а пункты, например, нивелирных наблюдений должны быть сосредоточены в центральной части объектов нефтегазодобычи.

В последние годы, в связи со стремительным развитием и широким применением ГНСС-наблюдений, практикуется повсеместное использование спутниковой геодезии для создания сетей геодинамического мониторинга месторождений. Учитывая, что вертикальная компонента при ГНСС-измерениях определяется менее точно, чем горизонтальная, исследователи проектируют геодинамические полигоны путем закладки нивелирных профилей, пересекающих месторождение, и пунктов ГНСС, которые стремятся расположить преимущественно в центральной части залежи. Как следует из рис. 2, б подобная конфигурация измерительной сети существенно снижает информативность результатов, полученных методами космической геодезии.

В самое последнее время при наблюдениях за оседаниями земной поверхности стали использовать методы спутниковой радарной интерферометрии с синтезированной апертурой (РСА-интерферометрии) [21–23]. Однако, следует иметь в виду, что единственным измеряемым параметром в рамках этого метода является «наклонное расстояние», т. е. расстояние вдоль направления на спутник, которое не соответствует истинным вертикальным смещениям земной поверхности.

На рис. 4, б показано распределение вертикальных смещений земной поверхности, которое соответствует рис. 2, а. Сравнительный анализ истинных вертикальных смещений со смещениями, вычисленными по методу РСА-интерферометрии, показывает, что максимум оседания существенно (на 10 км) сдвигается вправо и влево от центра месторождения в зависимости от траектории движения спутника. Кроме того, амплитуда смещений в методе РСА – интерферометрии оказывается на 30 % меньше. В этой связи следует считать, что данный метод не может быть использован автономно и требует обязательного комплексирования с другими геодезическими методами.

Таким образом, особенности формирования деформаций земной поверхности, обусловленные разработкой месторождений, диктуют необходимость построения оптимального сочетания методов измерений. По мнению автора, наиболее рациональная структура геодинамического мониторинга для контроля обширных оседаний земной поверхности для целей оценки уровня геодинамической опасности объектов инфраструктуры месторождений представляется следующей.

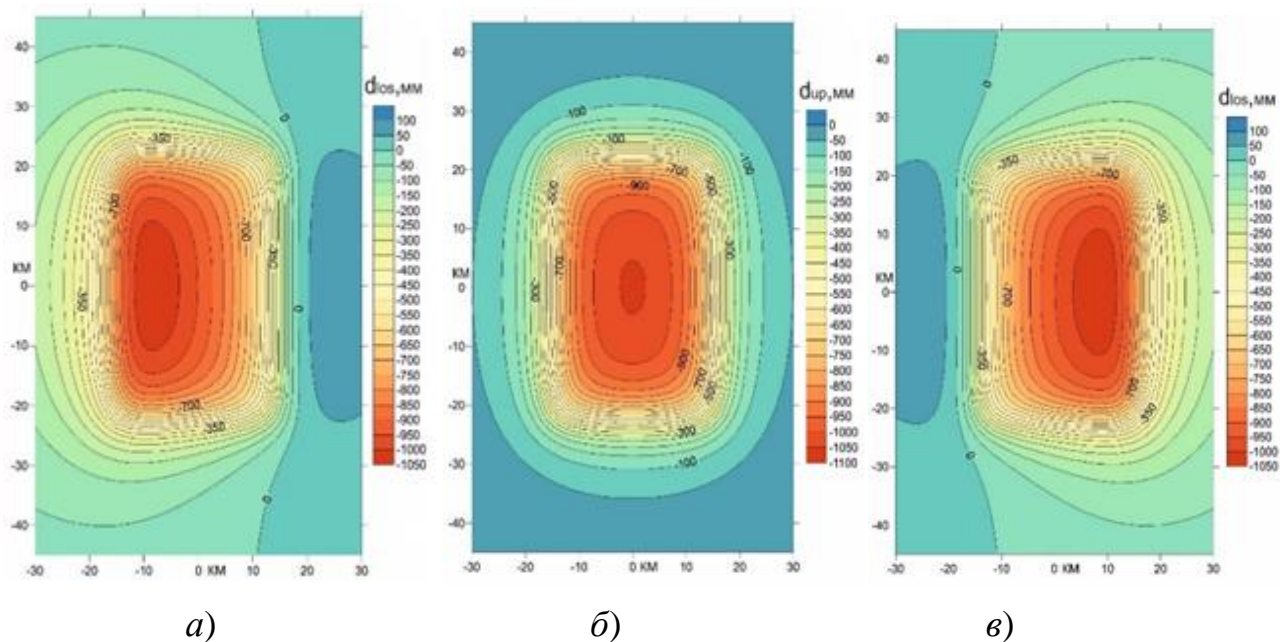


Рис. 4. Распределение расчетных вертикальных смещений земной поверхности для объемной модели пласта:

а) вычисленные по методу РСА-интерферометрии для нисходящего трека спутника; б) «истинные» смещения земной поверхности; в) вычисленные по методу РСА-интерферометрии для восходящего трека спутника

Для установления истинных амплитуд обширных просадок и характера затухания смещений от центра к периферии необходимо заложение двух «региональных» профилей вдоль и вкрест простирания горного отвода с расстоянием между реперами 300–500 м, заложение опорных пунктов на расстоянии 3–5 км от границы залежи и проведение повторных нивелирных наблюдений 2-го класса точности с интервалом не реже, чем 1 раз в год. В местах пересечения зон тектонических нарушений (разломов) необходимо сгущение реперов до расстояний 100 м между ними.

Для измерения горизонтальной компоненты смещений земной поверхности необходимо «зональное» построение сети ГНСС наблюдений с расположением пунктов в краевых зонах месторождения, при этом надо избегать закладок реперов в центральной части. Система ГНСС-наблюдений должна сочетать временные и стационарные наблюдательные пункты. Стационарные пункты должны быть организованы как за пределами горного отвода, так и в его периферийной зоне.

Проведение мониторинга деформаций с помощью РСА-интерферометрии возможно только совместно с другими спутниковыми и наземными методами геодезических измерений. Только в этом случае возможно максимально использовать главное преимущество радарной съемки – построение площадной картины оседаний земной поверхности.



Для того, чтобы контролировать второй тип деформационных последствий разработки месторождений УВ – активизацию разломных зон, необходимо использовать «приразломные» участки в пределах «региональных» нивелирных профилей и организовывать «локальные» сети наземных геодезических наблюдений в виде коротких (3–5 км) профилей с расстоянием между реперами 100 м и ежегодной частотой опроса в местах сосредоточения объектов инфраструктуры. Для уточнения временной структуры деформационных процессов следует учитывать результаты спектрально-временного анализа геодезических наблюдений, как это делается, например, на геодинамических полигонах, организованных в сейсмоактивных регионах [24]. При наблюдениях вертикальных смещений необходимо использовать нивелирование 2-го класса, а для горизонтальных – тахеометрическую трилатерационную съемку. В обоих случаях максимальная эффективность и метрологический контроль обеспечивается использованием роботизированных электронных тахеометров и нивелиров [25].

### Заключение

Приведены результаты математического моделирования деформационных последствий разработки месторождений нефти и газа, которые демонстрируют геомеханические ограничения при определении оптимальной конфигурации размещения измерительных сетей геодинамического мониторинга методами наземной и спутниковой геодезии.

Предложен вариант организации системы повторных и стационарных геодезических наблюдений (геодинамического полигона), который оптимальным образом учитывает особенности формирования аномальных деформаций земной поверхности и сочетание методов с различной пространственно-временной детальностью измерений.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Института физики Земли им. О. Ю. Шмидта РАН.*

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Инструкция по производству маркшейдерских работ (РД 07-603-03). – М. : Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России». – 120 с.
2. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании. – М. : Агентство экономических новостей, 1999. – 220 с.
3. Geertsma J. Land subsidence above compacting oil and gas reservoirs // Journal of petroleum technology. – V. 50. – 1973. – June. – P. 734–744.
4. Кузьмин Ю. О. Еще раз об оценке оседания дна акватории в случае разработки сеноманской залежи одного газового месторождения // Маркшейдерский вестник. – 2010. – № 1. – С. 53–60.
5. Черных В. А. Гидрогеомеханика нефтегазодобычи. – М. : ООО «ВНИИГАЗ», 2001. – 249 с.
6. Mindlin R., Cheng D. H. Nuclei of Strain in the Semi-Infinite Solid // J. Appl. Phys. – 1950. – V. 21, № 9. – P. 926–930.

7. Кашников Ю. А., Ашихмин С. Г. Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья. – М. : ООО «Недра-Бизнесцентр». – 2007. – 467 с.
8. Dzurisin D. Volcano deformation. Geodetic monitoring techniques // Springer. – 2007. – 442 p.
9. Zoback M. D. Reservoir geomechanics // Cambridge Univ. Press. – 2007.
10. Оценка процессов проседания земной поверхности при разработке газовых месторождений (на примере Северо-Ставропольского месторождения) / В. С. Жуков, Ю. О. Кузьмин, Г. А. Полоудин // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2002. – № 7. – С. 54–57.
11. Современная геодинамика и сейсмичность Юго-Востока Татарстана / Р. С. Хисамов, Н. С. Гатиятуллин, Ю. О. Кузьмин и др. ; под ред. Р. С. Хисамова и Ю. О. Кузьмина. – Казань : Фэн, 2012. – 240 с.
12. Анализ деформаций земной поверхности на Степновском подземном хранилище газа методами спутниковой и наземной геодезии / С. С. Квятковская, Ю. О. Кузьмин, Р. С. Никитин, Е. А. Фаттахов // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 3. – С. 16–32.
13. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика: от движений земной коры до мониторинга ответственных объектов // Физика Земли. – 2019. – № 1. – С. 78–103.
14. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика раздвиговых разломов // Физика Земли. – 2018. – № 6. – С. 87–105.
15. Кузьмин Ю. О. Индуцированные деформации разломных зон // Физика Земли. – 2019. – № 5. – С. 61–75.
16. Кузьмин Ю. О. Идентификация результатов повторных геодезических наблюдений при оценке геодинамической опасности объектов недропользования // Вестник СГУГиТ. – 2018. – Т. 23, № 4. – С. 46–66.
17. Кузьмин Ю. О., Никонов А. И. Геодинамическая природа аварийности скважин и трубопроводных систем // Перспективы развития экологического страхования в газовой промышленности. – М. : Газпром, 1998. – С. 315–328.
18. Кузьмин Ю. О. Современная геодинамика разломов и эколого-промышленная безопасность объектов нефтегазового комплекса // Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений. – 2007. – № 1. – С. 33–41.
19. СП 11-104-97. Инженерно-геодезические изыскания для строительства. – М. : ПНИИИС Госстроя России, 1997.
20. СП 22.13330.2016. Свод правил. Инженерные изыскания для строительства. Основные положения. Актуализированная версия СНиП 11-02-96. – М. : Стандартинформ, 2017.
21. Кузьмин Ю. О. Актуальные проблемы идентификации результатов наблюдений в современной геодинамике // Физика Земли. – 2014. – № 5. – С. 51–64.
22. Кузьмин Ю. О. Парадоксы сопоставительного анализа измерений методами наземной и спутниковой геодезии в современной геодинамике // Физика Земли. – 2017. – № 6. – С. 24–39.
23. Ketelaar V. B. H. Satellite radar Interferometry. Subsidence monitoring Techniques // Delft University of technology, the Netherlands. – 2009.
24. Фаттахов Е. А. Спектрально-временной анализ светодальномерных наблюдений на Камчатском и Ашхабадском геодинамических полигонах // Вестник СГУГиТ. – 2017. – Т. 22, № 4. – С. 5–17.
25. Хиллер Б., Ямбаев Х. К. Разработка и натурные испытания автоматизированной системы деформационного мониторинга // Вестник СГУГиТ. – 2016. – Вып. 1 (33). – С. 48–61.

Получено 02.09.2019

© Ю. О. Кузьмин, 2020

## TOPICAL ISSUES OF USE OF GEODETIC MEASUREMENTS AT GEODYNAMIC MONITORING OF OBJECTS OF OIL AND GAS COMPLEX

*Yuriy O. Kuzmin*

Schmidt Institute of Physics of the Earth of the Russian Academy of Sciences, 10-1, Bolshaya Gruzinskaya St., Moscow, 123242, Russia, Professor, D. Sc., Head of the Department of Exploration Geophysics and Applied Geodynamics, phone: (499)254-65-65, e-mail: kuzmin@ifz.ru

Actual problems that arise in the design and analysis of the results of repeated surveying and geodetic observations of the modern geodynamic state of the mining allotments of hydrocarbon deposits and underground gas storage facilities are discussed. A review of a large data set shows that there are two main forms of abnormal deformations of the earth's surface due to the exploitation of oil and gas facilities – extensive subsidence of the field's territory and local deformation of fault zones.

The results of mathematical modeling of the formation of deformations of the earth's surface caused by the development of deposits are presented and it is shown that the maximum amplitudes of the vertical displacements of the earth's surface are concentrated in the central part of the deposits, and the maxima of the horizontal ones are in the peripheral part. It is established that the influence of the earth's surface, free of stresses, leads to the fact that the amplitudes of vertical displacements, *ceteris paribus*, always prevail over horizontal ones, which are formed under conditions of horizontal constraint from the side of the surrounding rocks. Based on the developed model, the distribution of the gradients of vertical (slopes) and horizontal (relative deformations) displacements of the earth's surface, which are compared with critical (normative) values, is constructed.

Objective limitations are demonstrated that arise when comparing the results of observations obtained by satellite and ground-based geodesy and, in particular, using satellite radar interferometry. Concrete solutions and schemes for constructing a system of geodynamic observations and optimal regulations for conducting geodynamic monitoring of fields to ensure industrial safety of infrastructure facilities are proposed.

**Key words:** modeling, deformations of the earth's surface, displacement gradients, satellite radar interferometry, geodetic measurements, geodynamic monitoring, oil and gas fields.

### REFERENCES

1. Guidance Document. (2003). Instructions for the production of mine surveying (GD 07603-03). Moscow [in Russian].
2. Kuzmin, Yu. O. (1999). *Sovremennaja geodinamika i ocenka geodinamicheskogo riska pri nedropol'zovanii [Recent geodynamics and evaluation of geodynamic risk at use of subsoil resources]*. Moscow: Agentstvo jekonomicheskikh novostej, 220 p. [in Russian].
3. Kuzmin, Yu. O. (2010). Once again on the assessment of the bottom subsidence of the water area in the case of the development of the Cenomanian Deposit of one gas field. *Markshejderskij vestnik [Mine Surveying Bulletin]*, 6, 24–31 [in Russian].
4. Geertsma J. (1973). Land subsidence above compacting oil and gas reservoirs // *Journal of petroleum technology*. – v.50. – June. – pp. 734-744.
5. Chernykh V. A. (2001). *Gidromechanika neftegazodobychi [Hydromechanics of oil and gas production]*. – Moscow: LLC "VNIIGAZ" Publ. – 2001. – 249 p. [in Russian].
6. Mindlin R., Cheng D.H. (1950). Nuclei of Strain in the Semi-Infinite Solid. *J. Appl. Phys.*, 21(9), pp. 926-930.
7. A. Kashnikov, S. G. (2007). *Mekhanika gornyh porod pri razrabotke mestorozhdenij uglevodorodnogo syr'ya [Rock Mechanics in the development of hydrocarbon deposits]*. - M.: LLC "Nedra-business Center" Publ. – 2007. – 467 p. [in Russian].

8. Dzurisin D. (2007). Volcano deformation. Geodetic monitoring techniques. Springer. – pp. 442.
9. Zoback M. D. (2007). Reservoir geomechanics // Cambridge Univ. Press.
10. Zhukov V. S., Kuz'min Yu. O., Polodin G. A. (2002). Evaluation of the processes of subsidence of the earth surface in the development of gas fields (on the example of Severo-Stavropol field). *Geology, Geophysics and development of oil and gas fields*, №7, pp. 54-57. [in Russian].
11. Khisamov, R. S., Gatiyatullin, N. S., Kuzmin, Yu. O., et al. (2012). *Sovremennaja geodinamika i sejsmichnost' Jugo-Vostoka Tatarstana [Recent Geodynamics and Seismicity of the Southeastern Tatarstan]*. R. S. Khisamov, & Yu. O. Kuzmin (Eds.). Kazan: Fen Publ., 240 p. [in Russian].
12. Kwiatkowska, S. S., Kuzmin, Yu. O., Nikitin, R. S., & Fattakhov, E. A. (2017). Analysis of the deformations of the ground surface on Stepnovskaya underground gas storage by methods of satellite and ground-based geodesy. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(3), 16–32 [in Russian].
13. Kuzmin Y.O. (2019). Recent geodynamics: from crustal movements to monitoring critical objects. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 55(1), pp. 65–86.
14. Kuzmin Y.O. (2018). Recent geodynamics of tensile faults. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 54(6), pp. 886–903.
15. Kuzmin Y.O. (2019). Induced deformations of fault zones. *Izvestiya, Physics of the Solid Earth*, 55(5), pp. 753–765.
16. Kuzmin Y.O. (2018). Identification of the results of repeated geodetic observations in assessing the geodynamic danger of subsoil use objects. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 23(4), 46–66 [in Russian].
17. Kuzmin Yu. O., Nikonov A. I. (1998). *Geodinamicheskaya priroda avarijnosti skvazhin i truboprovodnyh sistem [Geodynamic nature of accident rate of wells and pipeline systems]*. // In the book Prospects for the development of environmental insurance in the gas industry. – M. Gazprom. – pp. 315-328. [in Russian].
18. Kuzmin, Yu. O. (2007). Recent geodynamics of faults and environmental and industrial safety of oil and gas facilities. *Geology, Geophysics and Development of Oil and Gas Fields*, 1, 33-41 [in Russian].
19. SP 11-104-97. (1997). Engineering geodetic site investigations for construction. Moscow: PNIIS of the State Committee for Construction of Russia [in Russian].
20. SP 22.13330.2016. (2017). Soil bases of buildings and structures. Original positions. The updated version Construction norms and regulations 11-02-96. Moscow: Standartinform Publ. [in Russian].
21. Kuzmin Y.O. (2014). The topical problems of identifying the results of the observations in recent geodynamics. *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 50(5), pp. 641-654.
22. Kuzmin Y.O. (2017). Paradoxes of the comparative analysis of ground-based and satellite geodetic measurements in recent geodynamics // *Izvestiya. Physics of the Solid Earth*, 53(6), pp. 825-839.
23. Ketelaar V.B.H. (2009). Satellite radar Interferometry. Subsidence monitoring Techniques. *Delft University of technology, the Netherlands*.
24. Fattakhov, E. A. (2017). Spectral-temporal analysis of laser rangefinder observations on the Kamchatsky and Ashgabad geodynamic polygons. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 22(4), 5–17 [in Russian].
25. Hiller B., Yambaev Kh. K. (2016). Development and full-scale tests of an automated system of deformation monitoring. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*, 1(33) pp. 48-61.

Received 02.09.2019

© Y. O. Kuzmin, 2020