

УДК 550.311+ 622.278

Кузьмин Дмитрий Кузьмич,
младший научный сотрудник,
Институт физики Земли им. О.Ю.Шмидта РАН,
123242 г. Москва,
Большая Грузинская ул., 10, стр. 1
e-mail: dimak1292@mail.ru

**МОДЕЛИРОВАНИЕ СМЕЩЕНИЙ ЗЕМНОЙ
ПОВЕРХНОСТИ, ПОЛУЧЕННЫХ
РАЗЛИЧНЫМИ СПУТНИКАМИ
СО ВСТРОЕННЫМ МОДУЛЕМ РСА
(НА ПРИМЕРЕ МОНИТОРИНГА
МЕСТОРОЖДЕНИЙ НЕФТИ И ГАЗА)**

Аннотация:

Приведен модельный анализ вертикальных смещений, полученных с помощью метода радарной спутниковой интерферометрии. Проведен анализ формул, на которых основан метод, выявлены закономерности распределения смещений в зависимости от составляющих горизонтальных и вертикальных компонент, а также различий между излучающими спутниками и их движений по нисходящему и восходящему трекам. Для моделирования использовались три спутника. Спутник ENVISAT был запущен Европейским космическим агентством (ESA) 1 марта 2002 г., а потерял связь с Землей в 2012 г. Другой спутник, на котором установлен радар с синтезированной апертурой, Terra SAR-X немецкого производства, был запущен в 2007 г. с космодрома г. Байконур. В 2015 г. ESA запустило спутник Sentinel-1A. Последние два летают по настоящее время. Для оценки вертикальных смещений проведено сопоставление модельных данных от всех трех спутников, пролетавших над территорией Астраханского месторождения в течение 13-ти лет, в процессе разработки продуктивного пласта. В каждом случае полученные расчетные данные графически сопоставлялись с аналитическими вертикальными смещениями. Выявлена динамика нарастания ошибки метода. Для анализа использовалась модель деформируемого пласта коллектора. Для моделирования использовались следующие параметры пласта: длина пласта 45 км, его ширина 30 км, мощность 100 м, средняя глубина залегания 4 км. По итогам сравнительного анализа был сделан вывод, что для оценки вертикальных смещений земной поверхности на разрабатываемых месторождениях нефти и газа методом РСА-интерферометрии необходимо соблюдать ряд принципов, а именно учитывать вклад горизонтальных компонент смещений и анализировать полученные данные в комплексе с другими наземными и спутниковыми наблюдениями.

Ключевые слова: Геодинамический мониторинг, нивелирование, деформации земной поверхности, моделирование, РСА-интерферометрия, продуктивный пласт, точность наблюдений.

DOI: 10.25635/2313-1586.2021.02.094

Kuzmin Dmitry K.
Junior Researcher,
Schmidt Institute of Physics of the Earth
of the Russian Academy of Sciences,
123242, Russia, Moscow,
10-1 Bolshaya Gruzinskaya Str.
e-mail: dimak1292@mail.ru

**MODELING OF THE EARTH'S SURFACE
DISPLACEMENTS OBTAINED
BY VARIOUS SATELLITES WITH
A BUILT-IN SAR-MODULE
(EXEMPLIFIED BY MONITORING
OF OIL AND GAS FIELDS)**

Abstract:

The article presents a model analysis of vertical displacements obtained using the radar-satellite-interferometry method. The analysis of the formulas on which the method is based is carried out, the regularities of the distribution of displacements depending on the components of the horizontal and vertical components, as well as the differences between the radiating satellites and their movements along the descending and ascending tracks are revealed. Three satellites were used for the simulation. The ENVISAT satellite was launched by the European Space Agency (ESA) on March 1, 2002, and lost contact with Earth in 2012. Another satellite with a synthetic aperture radar, the German-made Terra SAR-X, was launched in 2007 from the Baikonur cosmodrome. In 2015, ESA launched the Sentinel-1A satellite. The last two fly to the present time. To estimate the vertical displacements, a comparison of model data from all three satellites, flying over the territory of the Astrakhan field for 13 years, during the development of the productive reservoir, was carried out. In each case, the obtained calculated data were graphically compared with the analytical vertical displacements. The dynamics of the method error increasing is revealed. The model of the deformable reservoir layer was used for the analysis. The following parameters of the layer were used for modeling: the length of the formation is 45 km, its width is 30 km, the thickness of the formation is 100 m, the average depth is 4 km. Based on the results of the comparative analysis, it was concluded that in order to assess the vertical displacements of the earth's surface in the developed oil and gas fields by radar-satellite-interferometry, it is necessary to observe a number of principles, namely, to take into account the contribution of the horizontal components of the displacements and to analyze the data obtained in conjunction with other ground and satellite observations.

Key words: Geodynamic monitoring, leveling, deformation of the Earth's surface, modeling, X-ray interferometry, productive layer, accuracy of observations.

Введение

Как известно, эксплуатация месторождений углеводородов обязывает недропользователей соблюдать требования Ростехнадзора. Нормативные требования предусматривают создание геодинамического полигона на месторождениях. Его главная задача – дать на основе повторных измерений своевременную оценку деформациям земной поверхности, которая оседает вследствие разработки продуктивных пластов. Геодинамический мониторинг включает в себя как методы наземных геодезических и геофизических наблюдений, так и спутниковые методы [1 – 7]. Одним из последних, часто используемых, является РСА метод (Спутниковая радарная интерферометрия с синтезированной апертурой) [8 – 10].

Этот метод основан на измерении наклонного расстояния вдоль направления на спутник, [11, 12]. Многие недропользователи зачастую используют его в качестве альтернативы наземным геодезическим измерениям, руководствуясь экономической выгодой. По итогу нескольких циклов РСА наблюдений они получают площадное распределение смещений земной поверхности и выдают их за истинные вертикальные смещения. В этой статье автор предлагает анализ идентификации вертикальных смещений в рамках данного метода и ставит вопрос об эффективности его применения при отсутствии сопоставления с результатами наземных наблюдений.

Метод измерения земной поверхности методом РСА-интерферометрии

Сегодня многие исследователи, использующие данный метод, доводят до заинтересованных лиц посредством научных публикаций [18, 21] информацию о высокой точности метода. Смещения земной поверхности за период между повторными съемками при анализе парных интерферограмм оцениваются с точностью в первые сантиметры, а при анализе серий радарных снимков – в первые миллиметры. Отсюда заинтересованные недропользователи находят целесообразным переход от традиционных наземных методов измерений к спутниковому методу, не требующему затрат на высокоточное нивелирование на территории месторождений, площади которых исчисляются тысячами квадратных километров.

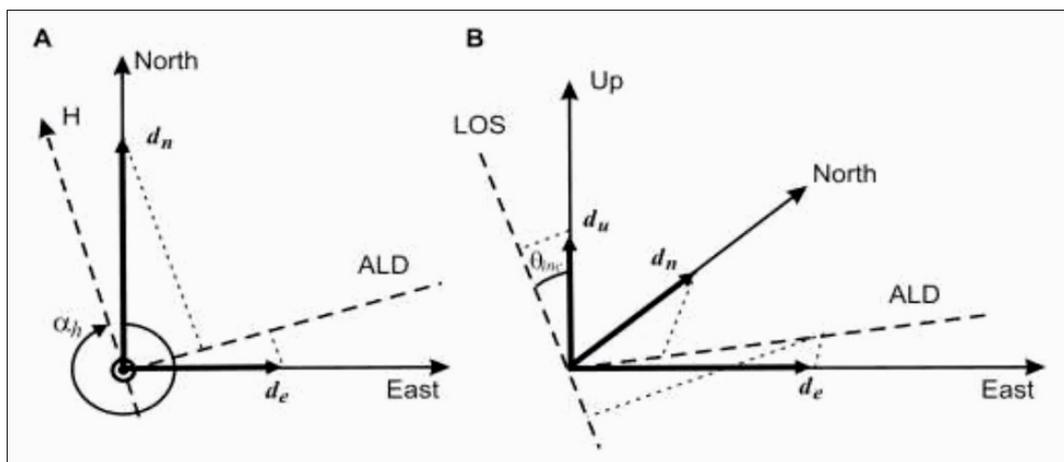


Рис. 1. Схема измерения земной поверхности методом РСА-интерферометрии

Суть метода основана на радиолокационной съемке, при которой отражателем является вся земная поверхность. В результате съемки имеются снимки одного и того же участка земной поверхности, измеренного спутником с локально параллельных орбит, и вычисляется комплексная интерферограмма. Далее вводятся коррекции с помощью цифровой модели рельефа и проводятся фильтрации для устранения различных шумов и ошибок измерений (учет атмосферных поправок и др.) [34]. На рис. 1 приведена схема измерения методом РСА-интерферометрии [11]. Каждый спутник, прово-

дящий измерение участка земной поверхности, характеризуется азимутом (углом, отсчитывающим направление от северного меридиана до направления видения спутника) и наклонной дальностью. В зависимости от частоты излучения и длины волны определяется критическая база спутника – расстояние, пролетая которое, спутник способен измерить участок земной поверхности, не теряя мощности излучения, а соответственно, и точности. Например, у спутника Sentinel с длиной волны 5,6 см базовая линия не должна превышать 1 км.

Смещение земной поверхности, определяемое по интерферограмме, равно проекции полного вектора смещений на направления на спутник. Известно, что вектор смещений в направлении на спутник d_{LOS} имеет три компоненты (вверх d_{up} , на север d_n и на восток d_e) [11 – 15]:

$$D_{LOS} = d_{up} \cdot \cos(\theta) + \sin(\theta) \cdot [d_n \cdot \cos(\beta) + d_e \cdot \sin(\beta)], \quad (1)$$

где $\beta = \alpha - 3\pi/2$.

Каждый спутник совершает движение по определенной орбите и имеет разные углы падения θ и азимуты α .

Так, например, для спутника ENVISAT формула (1) приобретает следующий вид:

$$D_{LOS} = 0,9 \cdot d_{up} - 0,01 \cdot d_n \pm 0,4 \cdot d_e. \quad (2)$$

Для спутника Terra SAR-X:

$$D_{LOS} = 0,82 \cdot d_{up} - 0,04 \cdot d_n \pm 0,58 \cdot d_e \quad (3)$$

Для спутника Sentinel-1A:

$$D_{LOS} = 0,78 \cdot d_{up} - 0,09 \cdot d_n \pm 0,62 \cdot d_e \quad (4)$$

Из-за вращения Земли спутник пролетает над одной и той же территорией дважды – с юга на север и с севера на юг. Отсюда меняется знак перед третьим слагаемым в формулах. Он соответствует нисходящему и восходящему трекам, соответственно.

Миссия спутника ENVISAT датируется 2002 – 2012 гг., Terra SAR-X и Sentinel-1A запущены в 2007 и 2015 г. и доступны по настоящее время. Если предположить, что месторождение эксплуатируется с 2002 г. и для геодинамического мониторинга используются спутниковые наблюдения, очевидно, что смещения, полученные после 2012 г., будут отличаться от смещений, получаемых ENVISATом, так как отличаются коэффициенты перед компонентами смещений в выше приведенных формулах. Более того, недропользователи зачастую пренебрегают горизонтальными смещениями d_n и d_e , оперируя тем, что они малы по сравнению с вертикальными. В итоге, если отбросить второе и третье слагаемые формул (1) – (3), полученные смещения идентифицируются как истинные вертикальные, несмотря на то, что перед компонентой d_{up} остается занижающий значения коэффициент, характеризующий наклонное измерение. Кроме того, пренебрежение горизонтальными компонентами смещений приводит к ошибке распределения вертикальных смещений в плане. В данной работе это будет показано с помощью моделирования.

Моделирование вертикальных смещений земной поверхности, полученных методом РСА-интерферометрии

Используя аналитическую модель деформируемого пласта [1, 16, 19, 23 – 25], которая неоднократно была апробирована на ряде нефтегазовых месторождений, включая шельфовые, ПХГ и в зонах активных разломов [22, 26 – 32], можно получить аналитические распределения смещений d_{up} , d_n и d_e для формулы (1). Для этого необходимо располагать данными геометрических параметров пласта того или иного месторождения, ПХГ, разлома, физических свойств горных пород, вмещающих пласт, а также данными изменения пластового давления за наблюдаемый период. Полученный результат позволяет редуцировать полученные данные радарной интерферометрии, а именно определять истинные вертикальные смещения путем исключения из вышеприведенной формулы горизонтальных компонент. В данном случае моделировался один из пластов

Астраханского газоконденсатного месторождения размерами 30×45 км, мощностью 100 м, залегающий на глубине 4 км. Начало эксплуатации месторождения датируется 1987 г. Согласно данным [33] среднее пластовое давление в 2000 г. составляло 53 МПа, а в 2010 г. 42 МПа. В связи с этим в данной работе, руководствуясь этими данными при расчетах, можно будет использовать среднегодовую скорость снижения давления в пласте, равную 1 МПа/год.

На рис. 2 построены сечения от смоделированных смещений d_{up} и D_{LOS} (нисходящий трек) вкрест простирания пласта, в рамках решения объемной задачи. Моделирование проведено при условии изменения пластового давления на величину, соответствующую году разработки. Так, например, для спутника ENVISAT, который предположительно мог пролететь над территорией Астраханского месторождения в 2002 г., значение пластового давления $\Delta P = 15$ МПа, так как с 1987 г. (начала разработки пласта) по 2002 г. прошло 15 лет. Соответственно, для спутника Terra SAR-X к 2007 г. значение $\Delta P = 20$ МПа, а для Sentinel-1A в 2017 г. $\Delta P = 28$ МПа.

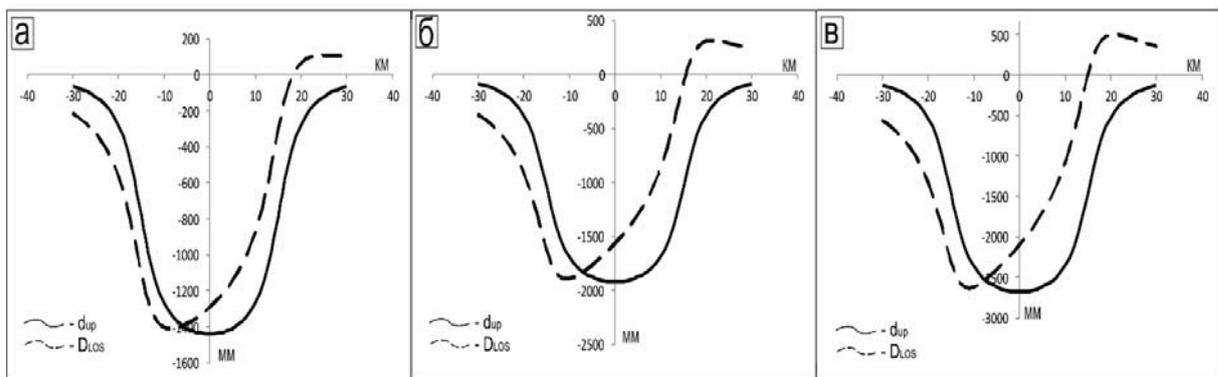


Рис. 2. Смоделированные значения смещений d_{up} и D_{LOS} при $\Delta P = 15$ МПа (а), $\Delta P = 20$ МПа (б) и $\Delta P = 28$ МПа (в)

Заметно, как максимальные значения вертикальных смещений на графике (а) смещаются на расстояние 9 км. Кроме того, кривые D_{LOS} имеют асимметричный характер. На графиках (б) и (в) эта разность составляет 11 км. Еще более грубо, по сравнению со спутником ENVISAT (а), ведут себя кривые D_{LOS} графиков (б) и (в) на расстояниях 20 – 30 км от центра моделируемого пласта. Наблюдаются более резкие наклоны, а именно они зачастую служат критериями геодинамической опасности [20].

Хвосты кривых D_{LOS} в правых частях графиков указывают на положительные вертикальные движения порядка от 10 до 50 см, чего не наблюдается в реальных условиях при добыче углеводородов.

Кроме того, максимальная амплитуда вертикальных смещений d_{up} на графике (а) на 2,5 см больше максимального значения кривой D_{LOS} , смоделированной для спутника ENVISAT. Для спутника Terra SAR-X (б) это значение занижено на 1,7 см относительно кривой d_{up} , а для Sentinel-1A на графике (в) значение максимального вертикального смещения D_{LOS} меньше на 6 см значения d_{up} . Эти расчеты указывают на несопоставимость результатов, полученных спутниковыми методами как с модельным вертикальным смещением, так и между собой.

В следующей аналитической задаче предлагается рассмотреть случай, в котором имеются снимки и с восходящего трека, и с нисходящего (рис. 3), что на практике осуществить не всегда возможно.

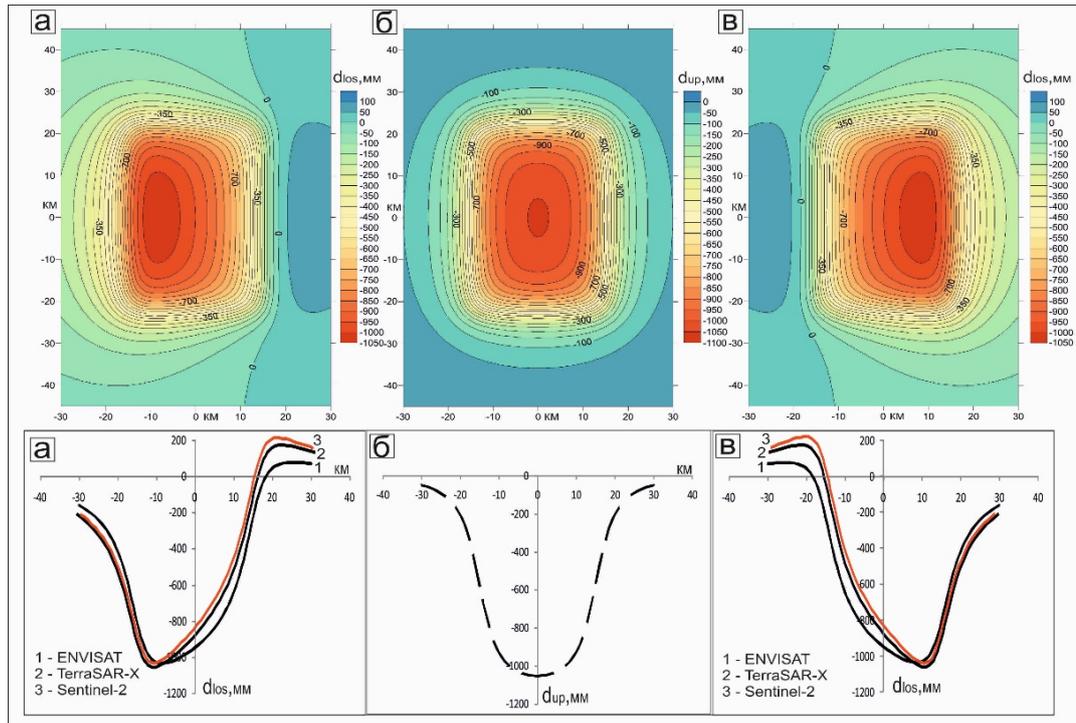


Рис. 3. Смоделированные значения смещений $d_{up}(\delta)$ и D_{LOS} по нисходящему (а) и восходящему (б) трекам при $\Delta P = 11$ МПа

В верхней части рис. 3 построены распределения вертикальных смещений (δ) и смещений D_{LOS} для нисходящего (а) и восходящего (б) треков в рамках объемной задачи при изменении пластового давления на 11 МПа. Ниже на рис. 3 построены сечения вкрест простирания пласта для трех исследуемых в этой статье спутников. Направивается предположение о том, что если взять средние значения смещений от нисходящего (а) и восходящего (б) треков, то устранится наблюдаемая асимметричность и получится кривая вертикальных смещений (δ). Если вернуться к формулам (1) – (3), станет очевидно, что действительно горизонтальная компонента d_e при этом усреднении взаимно компенсируется, однако свою роль в распределении вертикальных смещений сыграют компоненты d_{up} и d_n с их соответствующими коэффициентами. На рис. 4 представлены графики, полученные из этого расчета.

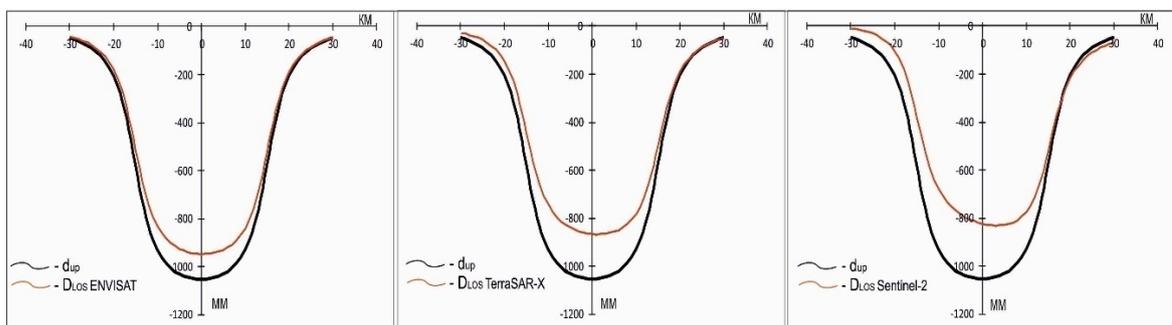


Рис. 4. Смоделированные значения смещений d_{up} и D_{LOS} при осреднении значений D_{LOS} восходящего и нисходящего треков

На приведенных графиках видно, что горизонтальная компонента смещений d_n , несмотря на очень маленькие коэффициенты по формулам, все равно влияет на конечный результат смещений D_{LOS} . Особенно это заметно на примере спутника Sentinel-1A.

Коэффициенты перед компонентами d_{up} в формулах (1) – (3) существенно снижают максимальную амплитуду смещений D_{LOS} , в данном случае на 10 – 25 см, в зависимости от используемого спутника. Если учесть угол падения θ и преобразовать наклонные смещения в вертикальные с помощью несложных тригонометрических вычислений, то амплитуды будут близки к истинным, однако это уже не будет являться смещением D_{LOS} . Суть метода состоит именно в измерении наклонного расстояния и дальнейшего получения комплексной интерферограммы.

Разница смещений d_{up} и D_{LOS} исчисляется сантиметрами и в вертикальном соотношении, и в плане. Например, на расстоянии 20 км эта разница достигает 8 см. Для сравнения, точность нивелирных наблюдений 4 класса допускает случайную среднеквадратическую ошибку 1 см/км. А на геодинамических полигонах, как правило, мониторинг движений земной поверхности предусматривает высокоточное нивелирование 1 или 2 класса (0,8 – 2 мм/км). Наблюдаемые ошибки могут повлиять на оценку градиентов смещений – наклонов и относительных деформаций, а те, в свою очередь, на своевременные рекомендации по устранению возможных негативных последствий на территориях объектов инфраструктуры нефтегазового комплекса [17]. Кроме того, последний рассмотренный случай предполагает идеальное отношение к идентификации вертикальных смещений, полученных РСА-методом. В действительности из-за вращения Земли вокруг своей оси спутнику далеко не всегда удастся увидеть одну и ту же территорию с восходящего и нисходящего треков. А сопоставлять снимки по трекам двух разных спутников, как показал анализ, некорректно. Отсюда множество примеров, когда, имея лишь данные, полученные по одному из треков, маркшейдерско-геодезические службы нефтегазовых компаний сталкиваются с расхождением результатов наземных и РСА-измерений. Из опубликованных данных [13] видно существенное расхождение между данными при сопоставлении нивелирных наблюдений с радарными данными на месторождениях в Астраханской области в Нидерландах.

Заключение

Как показало моделирование, истинные вертикальные смещения земной поверхности с помощью РСА-интерферометрии можно получить, только исключая из полученных данных горизонтальную компоненту аналитическим методом. Точность наблюдений за вертикальными смещениями зависит от спутника, от его ориентировки к Земле, и поэтому данные РСА-интерферометрии некорректно использовать напрямую для повторных наблюдений за вертикальными смещениями земной поверхности без комплексирования с другими методами наземной и спутниковой геодезии. Использование данных РСА-интерферометрии ведет к неверной оценке в прогнозах опасных деформаций, что может повлечь за собой серьезный экономический ущерб. В работах [18, 21] также проводилось сопоставление нивелирных наблюдений с радарными, однако там авторы сравнивали скорости изменения вертикальных смещений при условии наличия устойчивых отражателей вблизи грунтовых нивелирных пунктов. В результате сопоставимую с нивелирными измерениями точность показали 80 % отражателей. Установка таких пунктов по профилям на территории крупных месторождений делает этот метод еще более ресурсозатратным и нецелесообразным, если учитывать неоднозначную идентификацию полученных данных.

Список литературы

1. Кузьмин Ю.О., 1999. *Современная геодинамика и оценка геодинамического риска при недропользовании*. Москва: Агентство Экономических Новостей, 220 с.
2. Кузьмин Ю.О., 2008. Проблемные вопросы изучения деформационных процессов в современной геодинамике. *Горный информационно-аналитический бюллетень*, № 3, С. 98 – 107.

3. Кузьмин Ю.О., 2009. Тектонофизика и современная геодинамика. *Физика Земли*, №11, С. 44 – 60.
4. Кузьмин Ю.О., 2017. Парадоксы сопоставительного анализа измерений методами наземной и спутниковой геодезии в современной геодинамике. *Физика Земли*, № 6, С. 24 – 39.
5. Кузьмин Ю.О., 2019. Современная геодинамика: от движений земной коры до мониторинга ответственных объектов. *Физика Земли*, № 1, С. 78 – 103.
6. Кузьмин Ю.О., 2007. Современная геодинамика разломов и эколого-промышленная безопасность объектов нефтегазового комплекса. *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*, № 1, С. 33 – 41.
7. Сидоров В.А., Кузьмин Ю.О., 1989. Пространственно-временные характеристики современной динамики геофизической среды сейсмоактивных и асейсмичных областей. *Дискретные свойства геофизической среды*. Москва: Наука, С. 33 – 46.
8. Zhe Su et all, 2018. Monitoring interseismic activity on the Iian Plain (NE Taiwan) using Small Baseline PS-InSAR, GPS and leveling measurements: partitioning from arc-continent collision and backarc extension. *Geophysical Journal International*, 212, P. 264 - 283.
9. Михайлов В.О., Киселева Е.А., Дмитриев П.Н. и др., 2012. Оценка полного вектора смещений земной поверхности и техногенных объектов по данным радарной спутниковой интерферометрии для областей разработки месторождений нефти и газа. *Геофизические исследования*, № 3, С. 5 – 17.
10. Васильев Ю.В., Филатов А.В., 2016. Выявление зон локальных деформаций методом радарной интерферометрии по результатам мониторинга на Самотлорском геодинамическом полигоне. *Маркшейдерский вестник*, № 3 (112), С. 38 – 46.
11. Hanssen R.F., 2001. Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis. Academic Publishers, 308 p.
12. Ketelaar V.B.H., 2009. Satellite radar Interferometry. *Subsidence monitoring Techniques*. Delft University of technology, Netherlands. 241 p.
13. Кузьмин Ю.О., 2013. Физические основы измерения смещений земной поверхности методом РСА интерферометрии и проблемы их идентификации на месторождениях углеводородного сырья (УВ). *Маркшейдерский вестник*, № 5, С. 37 – 44.
14. Кузьмин Ю.О., 2014. Актуальные проблемы идентификации результатов наблюдений в современной геодинамике. *Физика Земли*, №5, С. 51 – 64.
15. Кузьмин Ю.О., 2020. Актуальные вопросы использования геодезических измерений при геодинамическом мониторинге объектов нефтегазового комплекса. *Вестник СГУГИТ*, Т. 25, № 1, С. 43 – 54.
16. Кузьмин Ю.О., 2002. Современная аномальная геодинамика асейсмичных разломных зон. *Вестник Отделения геологии, геофизики, геохимии и горных Наук РАН*, № 1 (20), 27 с.
17. Кузьмин Ю.О., 2018. Идентификация результатов повторных геодезических наблюдений при оценке геодинамической опасности объектов недропользования. *Вестник СГУГИТ*, Т. 23, № 4, С. 46 – 66.
18. Angkana Pampuang, Anuphao Aobpaet, 2020. The comparison of land subsidence between east and west side of Bangkok, Thailand. *Built Environment Journal*, №1, P. 1 - 8.
19. Кузьмин Ю.О., 2016. Современная геодинамика опасных разломов. *Физика Земли*, № 5, С. 87 – 101.
20. Абрамян Г.О., Кузьмин Д.К., 2019. Моделирование градиентов смещений земной поверхности на разрабатываемых месторождениях нефти и газа. *Маркшейдерский вестник*, № 5, С. 56 – 62.
21. Miguel Caro Cuenca et all. *Surface deformation of the whole Netherlands after PSI analysis*. Conference: Fringe 2011 Workshop – ESA. P. 1-8.

22. Кузьмин Д.К., 2019. Сопоставление моделей деформационной активности раздвиговых разломов с результатами геодинамического мониторинга объектов нефтегазового комплекса. *Проблемы недропользования*, № 4. С. 18 – 27. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.04.018
23. Кузьмин Ю.О., 2010. Еще раз об оценке оседания дна акватории в случае разработки сеноманской залежи одного газового месторождения. *Маркшейдерский вестник*, № 1, С. 53 – 60.
24. Кузьмин Д.К., 2020. Оценка напряженного состояния недр на разрабатываемых месторождениях нефти и газа. *Маркшейдерский вестник*, № 5 (138), С. 37 – 43.
25. Абрамян Г.О., Кузьмин Д.К., Кузьмин Ю.О., 2018. Решение обратных задач современной геодинамики недр на месторождениях углеводородов и подземных хранилищах газа. *Маркшейдерский вестник*, № 4, С. 52 – 61.
26. Кузьмин Ю.О., 2002. Современная аномальная геодинамика недр, индуцированная разработкой месторождений нефти и газа. *Фундаментальный базис новых технологий нефтяной и газовой промышленности*, Вып. 2. Москва: ГЕОС, С. 418 – 427.
27. Кузьмин Ю.О., 2015. Современная геодинамика системы разломов. *Физика Земли*, № 4, С. 25 – 30.
28. Кузьмин Ю.О., 2018. Современная геодинамика раздвиговых разломов. *Физика Земли*, № 6, С. 87 – 105.
29. Кузьмин Ю.О., 2019. Индуцированные деформации разломных зон. *Физика Земли*, № 5. С. 61 – 75.
30. Кузьмин Ю.О., Дещеревский А.В., Фаттахов Е.А., Кузьмин Д.К. и др., 2018. Инклинометрические наблюдения на месторождении им. Ю. Корчагина. *Геофизические процессы и биосфера*, Т. 53, № 3, С. 31 – 41.
31. Кузьмин Ю.О., Дещеревский А.В., Фаттахов Е.А., Кузьмин Д.К. и др., 2019. Анализ результатов деформационных наблюдений системой инклинометров на месторождении им. В. Филановского. *Геофизические процессы и биосфера*, Т. 18, № 4, С. 86 – 94.
32. Кузьмин Ю.О., Никонов А.И., 1998. Геодинамическая природа аварийности скважин и трубопроводных систем. *Перспективы развития экологического страхования в газовой промышленности*. Москва: ВНИИГАЗ, С. 315 – 328.
33. Кашников Ю.А., Ашихмин С.Г., 2019. *Механика горных пород при разработке месторождений углеводородного сырья: монография*. Москва: Горная книга, 496 с.
34. Михайлов В.О., Киселева Е.А., Барях А.А., Исаев Ю.С., Смольянинова Е.И., 2019. Возможности мониторинга динамики развития оседаний земной поверхности на территории г. Березники по снимкам спутника Сентинель. / *Физические основы прогнозирования разрушения горных пород: сборник 11-ой Всероссийской школы-семинара с международным участием*. Тезисы докладов. Пермь: ГоИ УрО РАН, С. 35 – 36.

References

1. Kuz'min Yu.O., 1999. *Sovremennaya geodinamika i otsenka geodinamicheskogo riska pri nedropol'zovanii* [Modern geodynamics and assessment of geodynamic risk in subsurface use]. Moscow: Agentstvo Ekonomicheskikh Novostei, 220 p.
2. Kuz'min Yu.O., 2008. *Problemye voprosy izucheniya deformatsionnykh protsessov v sovremennoi geodinamike* [Problematic issues of studying deformation processes in modern geodynamics]. *Gornyi informatsionno-analiticheskii byulleten'*, № 3, p. 98 – 107.
3. Kuz'min Yu.O., 2009. *Tektonofizika i sovremennaya geodinamika* [Tectonophysics and modern geodynamics]. *Fizika Zemli*, №11, p. 44 – 60.
4. Kuz'min Yu.O., 2017. *Paradoksy sopostavitel'nogo analiza izmerenii metodami nazemnoi i sputnikovoi geodezii v sovremennoi geodinamike* [Paradoxes of comparative

analysis of measurements by methods of ground and satellite geodesy in modern geodynamics]. *Fizika Zemli*, № 6, p. 24 – 39.

5. Kuz'min Yu.O., 2019. *Sovremennaya geodinamika: ot dvizhenii zemnoi kory do monitoringa otvetstvennykh ob"ektov* [Modern geodynamics: from the movements of the Earth's crust to the monitoring of amenable objects]. *Fizika Zemli*, № 1, p. 78 – 103.

6. Kuz'min Yu.O., 2007. *Sovremennaya geodinamika razlomov i ekologo-promyshlennaya bezopasnost' ob"ektov neftegazovogo kompleksa* [Modern geodynamics of faults and ecological and industrial safety of oil and gas facilities]. *Geologiya, geofizika i razrabotka neftyanykh i gazovykh mestorozhdenii*, № 1, p. 33 – 41.

7. Sidorov V.A., Kuz'min Yu.O., 1989. *Prostranstvenno-vremennye kharakteristiki sovremennoi dinamiki geofizicheskoi sredy seismoaktivnykh i aseismichnykh oblastei* [Spatial-and-temporal characteristics of the modern dynamics of the geophysical environment of seismically active and aseismic regions]. *Diskretnye svoistva geofizicheskoi sredy*. Moscow: Nauka, p. 33 – 46.

8. Zhe Su et al, 2018. Monitoring interseismic activity on the Ilan Plain (NE Taiwan) using Small Baseline PS-InSAR, GPS and leveling measurements: partitioning from arc-continent collision and backarc extension. *Geophysical Journal International*, 212, P. 264 - 283.

9. Mikhailov V.O., Kiseleva E.A., Dmitriev P.N. i dr., 2012. *Otsenka polnogo vektora smeshchenii zemnoi poverkhnosti i tekhnogennykh ob"ektov po dannym radarnoi sputnikovoi interferometrii dlya oblastei razrabotki mestorozhdenii nefi i gaza* [Estimation of the total displacement vector of the Earth's surface and man-made objects according to radar satellite interferometry data for the areas of oil and gas field development]. *Geofizicheskie issledovaniya*, № 3, p. 5 – 17.

10. Vasil'ev Yu.V., Filatov A.V., 2016. *Vyyavlenie zon lokal'nykh deformatsii metodom radarnoi interferometrii po rezul'tatam monitoringa na Samotlorskom geodinamicheskom poligone* [Identification of local deformation zones by radar interferometry method basing on the results of monitoring at the Samotlor geodynamic polygon]. *Marksheiderskii vestnik*, № 3 (112), p. 38 – 46.

11. Hanssen R.F., 2001. *Radar Interferometry: Data Interpretation and Error Analysis*. Academic Publishers, 308 p.

12. Ketelaar V.B.H., 2009. *Satellite radar Interferometry. Subsidence monitoring Techniques*. Delft University of technology, Netherlands. 241 p.

13. Kuz'min Yu.O., 2013. *Fizicheskie osnovy izmereniya smeshchenii zemnoi poverkhnosti metodom RSA interferometrii i problemy ikh identifikatsii na mestorozhdeniyakh uglevodorodnogo syr'ya (UV)* [The physical basis of measuring the displacements of the Earth's surface by the SAR-interferometry method and the problems of their identification in hydrocarbon deposits (HC)]. *Marksheiderskii vestnik*, № 5, p. 37 – 44.

14. Kuz'min Yu.O., 2014. *Aktual'nye problemy identifikatsii rezul'tatov nablyudenii v sovremennoi geodinamike* [Actual problems of identification of the results of observations in modern geodynamics]. *Fizika Zemli*, №5, p. 51 – 64.

15. Kuz'min Yu.O., 2020. *Aktual'nye voprosy ispol'zovaniya geodezicheskikh izmerenii pri geodinamicheskom monitoringe ob"ektov neftegazovogo kompleksa* [Topical issues of the use of geodesic measurements in geodynamic monitoring of oil and gas complex objects]. *Vestnik SGUGIT*, T. 25, № 1, p. 43 – 54.

16. Kuz'min Yu.O., 2002. *Sovremennaya anomal'naya geodinamika aseismichnykh razlomnykh zon* [Modern anomalous geodynamics of aseismic fault zones]. *Vestnik Otdeleniya geologii, geofiziki, geokhimii i gornykh Nauk RAN*, № 1 (20), 27 p.

17. Kuz'min Yu.O., 2018. *Identifikatsiya rezul'tatov povtornykh geodezicheskikh nablyudenii pri otsenke geodinamicheskoi opasnosti ob"ektov nedropol'zovaniya* [Identification of the results of repeated geological observations when assessing the geodynamic hazard of the objects of subsurface use]. *Vestnik SGUGIT*, T. 23, № 4, p. 46 – 66.

18. Angkana Pampuang, Anuphao Aobpaet, 2020. The comparison of land subsidence between east and west side of Bangkok, Thailand. Built Environment Journal, №1, P. 1 - 8.
19. Kuz'min Yu.O., 2016. *Sovremennaya geodinamika opasnykh razlomov* [Modern geodynamics of dangerous faults]. Fizika Zemli, № 5, p. 87 – 101.
20. Abramyan G.O., Kuz'min D.K., 2019. *Modelirovanie gradientov smeshchenii zemnoi poverkhnosti na razrabatyvaemykh mestorozhdeniyakh nefi i gaza* [Modeling of gradients of displacements of the Earth's surface in the developed oil and gas fields]. Marksheiderskii vestnik, № 5, p. 56 – 62.
21. Miguel Caro Cuenca et all. Surface deformation of the whole Netherlands after PSI analysis. Conference: Fringe 2011 Workshop – ESA. P. 1-8.
22. Kuz'min D.K., 2019. *Sopostavlenie modelei deformatsionnoi aktivnosti razdvigovykh razlomov s rezul'tatami geodinamicheskogo monitoringa ob'ektov nefte-gazovogo kompleksa* [Comparison of models of deformation activity of thrust faults with results of geodynamic monitoring of objects of oil and gas complex]. Problemy nedropol'zovaniya, № 4. p. 18 – 27. DOI: 10.25635/2313-1586.2019.04.018
23. Kuz'min Yu.O., 2010. *Eshche raz ob otsenke osedaniya dna akvatorii v sluchae razrabotki senomanskoï zalezhi odnogo gazovogo mestorozhdeniya* [More about bottom subsidence assessment of the water area in the case of the development of the Cenomanian deposit of a gas field]. Marksheiderskii vestnik, № 1, S. 53 – 60.
24. Kuz'min D.K., 2020. *Otsenka napryazhennogo sostoyaniya nedr na razrabatyvaemykh mestorozhdeniyakh nefi i gaza* [Assessment of the stress state of the subsurface at the developed oil and gas fields]. Marksheiderskii vestnik, № 5 (138), p. 37 – 43.
25. Abramyan G.O., Kuz'min D.K., Kuz'min Yu.O., 2018. *Reshenie obratnykh zadach sovremennoi geodinamiki nedr na mestorozhdeniyakh uglevodorodov i podzemnykh khrani-lishchakh gaza* [Solving inverse problems of modern geodynamics of subsurface resources in hydrocarbon deposits and underground gas storage facilities]. Marksheiderskii vestnik, № 4, p. 52 – 61.
26. Kuz'min Yu.O., 2002. *Sovremennaya anomal'naya geodinamika nedr, indutsirovannaya razrabotkoi mestorozhdenii nefi i gaza* [Modern anomalous geodynamics of subsurface, induced by development of oil and gas fields]. Fundamental'nyi bazis novykh tekhnologii neftyanoi i gazovoi promyshlennosti, Vyp. 2. Moscow: GEOS, p. 418 – 427.
27. Kuz'min Yu.O., 2015. *Sovremennaya geodinamika sistemy razlomov* [Modern geodynamics of the fault system]. Fizika Zemli, № 4, p. 25 – 30.
28. Kuz'min Yu.O., 2018. *Sovremennaya geodinamika razdvigovykh razlomov.* [Modern geodynamics of sliding faults.] Fizika Zemli, № 6, p. 87 – 105.
29. Kuz'min Yu.O., 2019. *Indutsirovannyye deformatsii razlomnykh zon* [Induced deformations of fault zones]. Fizika Zemli, № 5. S. 61 – 75.
30. Kuz'min Yu.O., Deshcherevskii A.V., Fattakhov E.A., Kuz'min D.K. i dr., 2018. *Inklinometricheskie nablyudeniya na mestorozhdenii im. Yu. Korchagina* [Inclinometric observations at the Yu. Korchagin field]. Geofizicheskie protsessy i biosfera, T. 53, № 3, p. 31 - 41.
31. Kuz'min Yu.O., Deshcherevskii A.V., Fattakhov E.A., Kuz'min D.K. i dr., 2019. *Analiz rezul'tatov deformatsionnykh nablyudenii sistemoi inklinometrov na mesto-rozhdenii im. V. Filanovskogo* [Analysis of the results of deformation observations by the inclinometer system at the V. Filanovsky field]. Geofizicheskie protsessy i biosfera, T. 18, № 4, p. 86 – 94.
32. Kuz'min Yu.O., Nikonov A.I., 1998. *Geodinamicheskaya priroda avariinosti skvazhin i truboprovodnykh sistem* [Geodynamic nature of the accident rate of wells and pipeline systems]. Perspektivy razvitiya ekologicheskogo strakhovaniya v gazovoi promyshlennosti. Moscow: VNIIGAZ, p. 315 – 328.

33. Kashnikov Yu.A., Ashikhmin S.G., 2019. *Mekhanika gornykh porod pri razrabotke mestorozhdenii uglevodorodnogo syr'ya: monografiya* [Mechanics of rocks in the development of hydrocarbon deposits: monograph]. Moscow: Gornaya kniga, 496 p.

34. Mikhailov V.O., Kiseleva E.A., Baryakh A.A., Isaev Yu.S., Smol'yaninova E.I., 2019. *Vozmozhnosti monitoringa dinamiki razvitiya osedanii zemnoi poverkhnosti na territorii g. Berezniki po snimkam sputnika Sentinel'* [Possibilities of dynamic progress monitoring of the Earth's surface subsidence on the territory of the Berezniki city based on the images of the Sentinel satellite]. / *Fizicheskie osnovy prognozirovaniya razrusheniya gornykh porod: sbornik 11-oi Vserossiiskoi shkoly-seminara s mezhdunarodnym uchastiem. Tezisy dokladov*. Perm': GoI UrO RAN, p. 35 – 36.