

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

НАБЛЮДЕНИЕ ПРОСАДОК ПОВЕРХНОСТИ ЗЕМЛИ В РАЙОНЕ ПОДЗЕМНЫХ УГОЛЬНЫХ ВЫРАБОТОК КУЗБАССА ПО ДАННЫМ РАДИОЛОКАЦИОННОЙ ИНТЕРФЕРОМЕТРИИ ALOS PALSAR

© 2012 г. М. И. Эпов¹, В. Л. Миронов², Т. Н. Чимитдоржиев^{3*}, А. И. Захаров⁴, Л. Н. Захарова⁴,
В. С. Селезнев⁵, А. Ф. Еманов⁵, А. А. Еманов¹, А. В. Фатеев¹

¹ Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, Новосибирск

² Институт физики им. Л.В. Киренского СО РАН, Красноярск

³ Институт физического материаловедения СО РАН, Улан-Удэ

⁴ Фрязинский филиал Института радиотехники и электроники РАН, Фрязино, Моск. обл.

⁵ Геофизическая служба СО РАН, Новосибирск

*E-mail: tchimit@pres.bsnet.ru

Поступила в редакцию 19.10.2011 г.

В данной работе приводятся результаты космической радиолокационной интерферометрии просадок земной поверхности в местах шахтной добычи угля в Кузбассе. На основе сопоставления данных радиолокационных и синхронных сейсмических наблюдений обнаружено, что просадки грунта хорошо коррелируют с событиями техногенной сейсмичности.

Ключевые слова: радиолокационная интерферометрия, техногенная сейсмичность, локальная геодинамика, просадки грунта, подземные выработки, лава

ВВЕДЕНИЕ

Метод космической радиолокационной (РЛ) интерферометрии является в последнее время одним из наиболее популярных в арсенале современных аэрокосмических методов и технологий дистанционного зондирования (ДЗ) Земли. Благодаря уникальной информации о состоянии подстилающих покровов, получаемой этим методом, удается решать качественно новые задачи в разнообразных междисциплинарных исследованиях. Одним из ярких примеров успешного применения метода РЛ-интерферометрии являются мониторинг объектов нефтегазового комплекса, изучение геологического строения нефтегазоносных территорий, поиск месторождений нефти и газа, в том числе в арктических регионах, контроль нефте-, газо- и продуктопроводов, а также оценка экологического состояния мест добычи и транспортировки углеводородов на суше и на море (Бондур, 2010). Одно из новых возможных приложений интерферометрии — сопровождение разработки угольных месторождений (Negre et al., 2007; Strozzi et al., 2001; Wegmüller et al., 2000). Подземная добыча шахтным способом — один из самых опасных производств, а потому актуальной является проблема снижения риска и уменьшения последствий природных и техногенных катастроф, связанных с просадками и обвалами при подземных разработках угля, руды и т.д. Большинство

работ в данном направлении связано с исследованием возможностей и ограничений количественной оценки (определением точности этой оценки) просадок земной поверхности на основе радарных интерферометрических и GPS измерений. В известной нам литературе отсутствуют данные по оценке влияния техногенной сейсмичности, связанной с действующими лавами (лава — подземная горная выработка с забоем большой протяженности), с просадками грунта. Кроме того, участвовавшие в последнее время техногенные аварии в шахтах предполагают детальное междисциплинарное изучение всех сопутствующих процессов, включая и локальную геодинамику, для прогнозирования крупных катастроф в шахтах. Таким образом, цель данной работы заключается в исследовании взаимосвязи интенсивности и распределения эпицентров техногенных сейсмических процессов, полученных локальной сетью сейсмостанций в районе действующих лав, и локальных просадок грунта, измеренных методом РЛ-дифференциальной интерферометрии (ДРИ).

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Тестовый полигон для оценки возможностей метода спутниковой ДРИ при изучении и картировании геодинамических процессов, связанных с сейсмической активизацией при разработке угля, располагался в окрестностях г. Полысаево Ке-

меровской области. Данный участок характеризуется повышенной природной и техногенной сейсмичностью, последняя пространственно связана с расположением угольных выработок (Еманов и др. 2009, 2010).

Для обнаружения деформаций подстилающей поверхности использовались данные радара L-диапазона (PALSAR), установленного на спутнике ALOS (Японское аэрокосмическое агентство, JAXA). Минимально возможный временной интервал между двумя последовательными съемками равен 46 дням (период точного повторения орбиты для интерферометрической съемки).

На первом этапе исследования было проанализировано содержимое базы данных снимков PALSAR для тестового участка Польшаево и выявлено, что в базе данных ранее проведенных съемок имеются две группы по 13 снимков, пригодные для формирования интерферометрических пар. Для каждого из 26 снимков были составлены все возможные интерферометрические комбинации и выбраны те пары снимков, которые получены при одном режиме съемки и у которых пространственная база (расстояние между орбитами) не превышает нескольких сотен метров. Малая пространственная база считается предпочтительной – из-за меньшей пространственной декорреляции. Кроме того, при малой пространственной базе рельеф на интерферограмме, а также возможные ошибки цифровой модели рельефа, использованной на этапе получения дифференциальной интерферограммы, проявляются не столь сильно. Для исследуемого участка были выбраны и обработаны следующие интерферометрические пары (год, месяц, день):

1. 20071210–20080125 (перпендикулярная компонента базы составляет 629 м);
2. 20080628–20090816 (перпендикулярная компонента базы равна 230 м);
3. 20080727–20090914 (перпендикулярная компонента базы равна 2 м);
4. 20100617–20100802 (перпендикулярная компонента базы равна 277 м).

Для компенсации влияния рельефа на дифференциальной интерферограмме использовалась цифровая модель рельефа SRTM с разрешением 90 м, а для геопривязки был использован веб-портал Google. Следует отметить, что последний стал использоваться во многих приложениях аэрокосмической тематики, а потому далее с его помощью будем представлять полученные результаты.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ И ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

По всем указанным выше парам были построены интерферограммы. При этом установлено, что значительная часть площади интерферограмм

для пар 2 и 3, имевших временной интервал между съемками более года, характеризовалась низким качеством из-за повышенной, а местами и полной временной декорреляции отраженных сигналов. Причинами потери корреляции (или когерентности) отражений могут быть густая растительность, водные поверхности, а также модификация мелкомасштабного рельефа вследствие активной хозяйственной деятельности, или же низкий уровень обратного рассеяния. Перечисленные факторы приводят к повышению уровня шумов на интерферограмме и, как следствие, к ошибочной интерпретации РЛ-интерферометрических измерений. По этой причине делать заключения только по одной интерферограмме необходимо с большой степенью осторожности. Например, из-за 2π неоднозначности фазовых измерений проседания за длительный интервал времени участки поверхности с резкими краями могут быть ошибочно интерпретированы как участки, где имел место подъем поверхности. По этой причине в качестве основного измерительного материала были использованы интерферометрические пары с минимально возможной короткой 46-дневной временной базой, а пары с временным промежутком более года использовались в качестве дополнительных.

Крайне важным материалом для понимания природы возможных просадок послужили данные геофизических наблюдений. В 2007–2009 гг. в указанном районе проводилась серия сейсмологических наблюдений с помощью временной сети сейсмостанций (Еманов и др. 2009, 2010). Целью этих геофизических наблюдений было исследование влияния подземной добычи угля на сейсмические активизации в регионе. Совместная обработка данных сети сейсмостанций позволила определить положение эпицентров землетрясений (см. рис. 1 на цветн. вклейках) и оценить их глубину.

На рис. 1 представлен результат интерферометрических измерений просадок поверхности по паре 20071210–20080125 по модулю 2π , где черными точками выделено расположение эпицентров сейсмособытий, зарегистрированных сетью сейсмостанций Геофизической службы СО РАН за время между РЛ-съемками. Области опускания поверхности выделяются цветными интерферометрическими полосами, имеющими форму эллипса. Поскольку полный цикл цветовой палитры соответствует просадкам на половину длины волны, равной 24 см для радара PALSAR, а в некоторых местах отмечаются вариации разности фаз до двух полных цветовых циклов, то можно полагать, что величина просадок в некоторых

точках достигает до 24 см за указанный 46-дневный промежуток времени.

Хорошее согласие распределения эпицентров с местами просадок грунта, что наблюдается в правой и левой верхней частях рис. 1, вероятно, связаны с работающими лавами Толмачёвской, Бреевской и Надбайкоимской. Пласты, в которых ведется добыча угля, залегают здесь на глубине около 400 м. Анализ данных площадных сейсмонаблюдений показал, что эпицентры техногенных землетрясений располагаются преимущественно под выработками, на глубине от 400 до 1500 м. Сравнение сейсмологических измерений за различные периоды времени показало, что сейсмические активизации смещаются в пространстве вместе с забоем (Еманов и др., 2009), а данные полевых обследований подтверждают результаты интерферометрических наблюдений о том, что в районе техногенных активизаций, приуроченных к лавам, наблюдаются локальные аномалии в форме опускания.

Вместе с тем можно видеть, что с помощью интерферометрии также выявлены участки проседания поверхности там, где техногенные подземные толчки сейсмологической сетью не зарегистрированы, например, в нижней левой части интерферограммы. Совместный анализ всех четырех интерферометрических пар и данных сети сеймостанций (рис. 1) показывает, что вяло текущий сейсмический процесс, возникает и в других зонах аномального опускания, где нет работающих лав.

Следующая пара снимков, полученная 17 июня и 2 августа 2010 г., показывает, что в этом районе присутствует довольно сильная динамика поверхности. Временная база в данном случае также составляет 46 дней. На рис. 2 (на цветн. вклейках) представлены изолинии просадок с геопривязкой к данным веб-портала Google. Зеленым цветом выделены изолинии просадок на –2 см, голубым на –3 см, синим на –6 см, розовым на –9 см, красным на –12 см. Максимальные просадки до –13 см отмечались на небольших территориях и на данном рисунке не представлены.

В центральной части снимка выделяется область просадок, расположенная вдоль железной дороги, где подземные выработки в настоящее время не ведутся. Однако поскольку подземная добыча угля в этом регионе активно велась с 30-х годов прошлого столетия, можно полагать, что просадки в центральной части рис. 2 и в левом нижнем углу рис. 1 привязаны к ранним выработкам, информация о которых утеряна. Причиной сейсмических активизаций здесь могло быть движение поездов по железной дороге. Кроме того, не может быть оставлена без внимания гипотеза о некотором “запаздывании”, заключаю-

щемся в том, что толща грунта после сейсмособытия находится некоторое время в напряженном состоянии без значимых деформаций, а потом уже происходит просадка почвы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлена детерминированная связь между просадками рельефа и сейсмическими событиями в зоне подземной добычи угля, наблюдаемыми одновременно с помощью космической радарной интерферометрии и сети сейсмических станций. Явления проседания поверхности наблюдаются главным образом над действующими горными выработками и, как правило, сопровождаются сейсмическими событиями. В ряде случаев деформации рельефа поверхности в зонах без выработок могут быть индикатором обрушения старых неизвестных выработок, вызванного, например, движением поездов по железной дороге. Полученные в работе результаты открывают новые возможности для изучения связи техногенных сейсмических событий с деформациями поверхности, вызванными подземной добычей угля. В конечном итоге длительные совместные сейсмические и РЛ-наблюдения позволят разработать достоверные горно-геологические модели, отражающие динамику активных горных выработок.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Бондур В.Г.* Аэрокосмические методы и технологии мониторинга нефтегазоносных территорий и объектов нефтегазового комплекса // Исслед. Земли из космоса. 2010. № 6. С. 3–17.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Фатеев А.В., Семин А.Ю.* Сейсмические активизации при разработке угля в Кузбассе // Физич. мезомеханика. 2009. Т. 12. № 1. С. 37–43.
- Еманов А.Ф., Еманов А.А., Лескова Е.В., Фатеев А.В., Демидова А.А., Кузнецова Ю.В., Семин А.Ю., Ворона У.И., Рубцова А.В.* Наведенная сейсмичность в районе г. Польшаево (Кузбасс) // Землетрясения России в 2008 году. 2010. С. 101–107.
- Herrera G., Tomás R., Lopez-Sanchez J.M. et al.* Advanced DInSAR analysis on mining areas: La Union case study (Murcia, SE Spain) // Engin. Geology. 2007. V. 90. P. 148–159.
- Strozzi T., Wegmiüller U., Tosl L., Bitelli G. et al.* Land subsidence monitoring with differential SAR interferometry // Photogram. Engin. Rem. Sens. 2001. V. 67. № 11. P. 1261–1270.
- Wegmiüller U., Strozzi T., Werner C. et al.* Monitoring of mining-induced surface deformation in the Ruhrgebiet (Germany) with SAR interferometry // Proc. IGARSS'00. 24–28 July 2000. Honolulu. USA. 2000.

Observation of Earth's Surface Subsidence in the Area of Kuzbas Underground Coal Mining with ALOS PALSAR Radar Interferometry

M. I. Eпов¹, V. L. Mironov², T.N. Chymitdorzhiev³, A. I. Zakharov⁴, L. N. Zakharova⁴,
V. S. Seleznev⁵, A. F. Emanov⁵, A. A. Emanov¹, A. V. Fateev¹

¹ *A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk*

² *L.V. Kirensky Institute of Physics, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Krasnoyarsk*

³ *Institute of Physical Materials Science, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Ulan-Ude*

⁴ *Institute of Radioengineering and Electronics RAS, Fryazino, Moscow Region*

⁵ *Geophysical survey, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk*

In this paper, we report the results of the space radar interferometry with regard to land surface subsidence observed in areas of coal mining in the Kuzbass. Analysis based on a comparison of radar data and simultaneous seismic observations revealed that subsidence events correlate well with the man-made seismicity.

Keywords: radar interferometry, technogenic seismicity, local geodynamics, land subsidence, underground workings

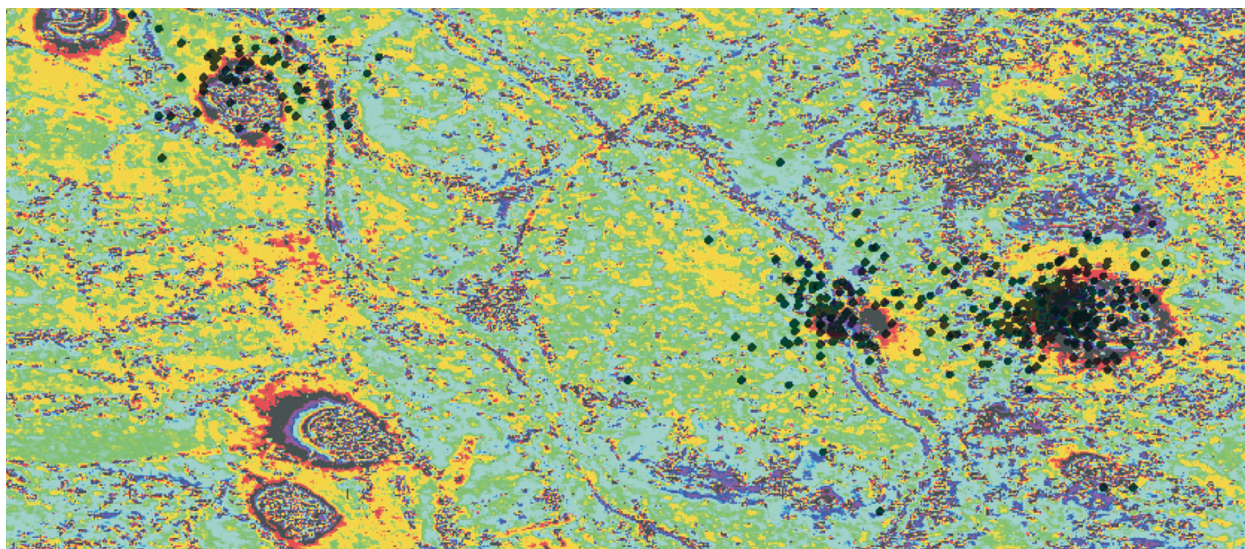


Рис. 1. Интерферограмма, полученная по паре 10 декабря 2007 г. – 25 января 2008 г.



Рис. 2. Фрагмент мозаики веб-портала Google с нанесенными изолиниями просадок грунта для пары 17 июня – 2 августа 2010 г.

