

Ю.И. Кантемиров
(ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)

В 2004 г. окончил РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина. После окончания университета работает в ООО «Газпром ВНИИГАЗ», в настоящее время – научный сотрудник лаборатории космической информации для целей газовой промышленности.

Ю.Б. Баранов (ООО «Газпром ВНИИГАЗ»)

В 1978 г. окончил Московский геологоразведочный институт (Российский государственный геологоразведочный университет – РГГРУ). В настоящее время – начальник отдела геоинформационных и космических технологий ООО «Газпром ВНИИГАЗ». Доктор геолого-минералогических наук, профессор кафедры геоинформатики РГГРУ

В.В. Билянский
(ООО «Газпром добыча Ямбург»)

В 1986 г. окончил Львовский политехнический институт (геодезический факультет) по специальности «астрономогеодезия». В настоящее время – главный маркшейдер ООО «Газпром добыча Уренгой».

Е.В. Киселевский (ОАО «Газпром»)

В 1976 г. окончил Московский горный институт. В настоящее время – начальник отдела нормативного и маркшейдерско-геодезического обеспечения недропользования ОАО «Газпром».

С.Э. Никифоров (Ростехнадзор, МГГУ)

В 2000 г. окончил Московский государственный горный университет по специальности «Маркшейдерское дело». В настоящее время – консультант Управления государственного горного и металлургического надзора, кандидат технических наук, доцент кафедры маркшейдерского дела и геодезии МГГУ.

Р. Ланцл (R. Lanzl; Infoterra GmbH, Германия)

Работает в компании Infoterra GmbH (Германия) менеджером по развитию бизнеса

Результаты мониторинга смещений земной поверхности и деформаций зданий и сооружений в г. Новый Уренгой по данным TerraSAR-X

Целевая многопроходная космическая радиолокационная съемка территории города Новый Уренгой со спутника TerraSAR-X (Infoterra GmbH, Германия) выполнена в период с 8 мая 2008 г. по 22 июля 2009 г. Всего за этот период было выполнено 33 последовательных прохода. Каждым проходом, состоящим из одного кадра, покрывалась определенная территория города Новый Уренгой (рис. 1).

Основные параметры съемки следующие:

- частота радиолокационного сигнала – 9.65 ГГц;
- длина зондирующей волны радиолокатора – 3,1 см;
- поляризационный режим – ГГ (горизонтальная-горизонтальная);

- режим съемки – высокдетальный (High Resolution Spotlight Mode);
- пространственное разрешение – 1 м;
- площадь кадра $\approx 10 \times 5$ км;
- восходящее направление орбиты;
- истинный азимут зондирующего луча радиолокатора – $83,5^\circ$;
- магнитное склонение $\approx 21^\circ$ (восточное);
- магнитный азимут зондирующего луча радиолокатора $\approx 62,5^\circ$;
- угол падения луча радиолокатора (от вертикали) $\approx 22,09^\circ$;

- периодичность съемки – от 11 дней между соседними проходами.



Рис. 1. Покрытие территории г. Новый Уренгой данными 33-проходной радиолокационной космосъемки со спутника TerraSAR-X

Целью выполняемых исследований было локализовать участки оседаний и воздыманий земной поверхности, а также деформации зданий и сооружений в г. Новый Уренгой, которые могут быть вызваны добычей газа из Уренгойского месторождения, закачкой промстоков или природными геодинамическими и геокриологическими причинами.

Интерферометрическая обработка данных TerraSAR-X производилась в программном комплексе ENVI SARscape (ITT, SARmap).

Для интерферометрической обработки данных TerraSAR-X в общем случае требуется наличие высокоточной цифровой модели рельефа для отделения фазы смещений земной поверхности от фазы рельефа, а также для выделения областей, подверженных эффектам «тени» и «переналожения». В нашем конкретном случае территория исследований является застроенной, что значительно меняет фазовую картину интерферограмм. В частности, для городской территории ожидаемая топографическая фаза радарных данных сверхвысокого разрешения, какими являются данные TerraSAR-X, включает в себя высоты зданий и сооружений, поскольку отражение радиолокационного сигнала

идет именно от них. Следовательно, в качестве опорной топографической информации нужно использовать цифровую модель не рельефа, а местности (то есть, с учетом высот зданий и сооружений).

Поэтому авторами были использованы имеющиеся в ООО «Газпром добыча Уренгой» данные лазерного сканирования, покрывающие полностью площадь обрабатываемого кадра TerraSAR-X.

Исходные данные были переданы авторам в формате ASCII-файла и представляют собой облако точек, для каждой из которых известны абсолютные координаты и высота над эллипсоидом Красовского. По этому облаку точек была построена цифровая модель местности, представляющая собой растровый геопозиционированный файл с пространственным разрешением 1 м, причем значение каждого пикселя этого файла соответствует возвышению над эллипсоидом Красовского.

Однако для обработки радарных данных TerraSAR-X требовалось пересчитать высоты над эллипсоидом Красовского в высоты над эллипсоидом WGS-84. Эта операция была выполнена с помощью координатного калькулятора, имеющегося в программном комплексе Erdas Imagine.

Полученная в результате цифровая модель местности с учетом высот зданий и сооружений (рис. 2) была использована в качестве опорной при интерферометрической обработке радарных данных TerraSAR-X.



Рис. 2. Цифровая трехмерная модель местности на г. Новый Уренгой, полученная по данным лазерного сканирования и совмещенная со снимком, полученным оптическим сенсором.

Таким образом, мониторинг зданий и сооружений на территории г. Новый Уренгой был выполнен с помощью новейшего радарного спутника TerraSAR-X (пространственное разрешение 1 м) с использованием трехмерной цифровой модели местности, рассчитанной по данным лазерного сканирования (пространственное разрешение 1 м), и данных GPS-станции, регистрирующей в режиме реального времени изменения своих плановых и высотных координат.

Схема интерферометрической обработки была следующей: по соседним парам снимков (1–2-й проходы, 2–3-й проходы и т. д.) были рассчитаны карты смещений земной поверхности, которые затем суммировались между собой. Такой подход позволил увидеть не просто суммарные смещения за период между 1-м и 33-м проходами, а развитие этих смещений в динамике.

На рис. 3 показаны смещения за период с 8 по 30 мая 2008 г. Белый цвет – высококогерентные области, характеризующиеся отсутствием смещений. Черный цвет – нет данных о смещениях (разрыв фазы в связи с низкой когерентностью). Зеленый цвет – чем интенсивнее, тем больше амплитуда воздымания. Красный цвет – чем интенсивнее, тем больше амплитуда оседания. Для всех последующих карт смещений использовалась аналогичная цветовая шкала. С 8 по 30 мая 2008 г. зарегистрированы два участка оседаний. Первый из них – в районе пересечения Заозерной и Загородной улиц (дома № 1а, 2в, 52, 54, 56), где за этот период зарегистрированы оседания от 1 до 2 см. Второй участок оседаний амплитудой 1–5 мм охватывает площадь, ограниченную Новой, Магистральной, Юбилейной и Таежной улицами. Внутри этого участка дешифрируется локальный максимум оседаний амплитудой около 1 см на участке, ограниченном Новой, Магистральной, Ямальской и Сибирской улицами. Также малые смещения (первые миллиметры) зафиксированы для многих зданий и сооружений к западу от улицы Крайней. В районе домов № 46, 48 и 50 по улице Таежной зафиксировано воздымание в пределах 0,5 см. Далее все смещения земной поверхности отслеживались начиная от 8 мая 2008 года.

К 10 июня 2008 г. ситуация со смещениями в основ-

ном осталась прежней (рис. 4). Уверенно определяются два тех же локальных участка оседаний и один тот же локальный участок воздыманий.

По состоянию на 21 июня (рис. 5) первый участок оседаний, в районе пересечения улиц Заозерной и Загородной сохраняется без изменений, второй участок оседаний, ограниченный Новой, Магистральной, Ямальской и Сибирской улицами, расширяется по площади и интенсифицируется по амплитуде (в районе пересечения Новой и Сибирской улиц оседания достигают 2–2,5 см). Незначительные оседания остаются в районах к западу от улицы Крайней, а также появляются в микрорайонах Солнечный и Заозерный. Сохраняется локальный участок незначительных оседаний в районе домов № 46, 48 и 50 по улице Таежной. Также появился ареал оседаний земной поверхности в микрорайоне Мирный (к северу от реки Седз-Яха). Появляются новые локальные участки воздыманий амплитудой в первые миллиметры в районе домов № 17а, 17б, 17в, 17г, 19 и 21 по улице Молодежной и в районе домов № 2, 2а и 2б по ул. Геологоразведчиков. Кроме того, воздымания появляются вдоль автодороги, идущей на север от микрорайона Монтажник. Незначительными воздыманиями характеризуется множество зданий и сооружений по обе стороны от проспекта Губкина. Наконец, ареал незначительных по амплитуде воздыманий появился в микрорайоне Юбилейный (к северу от реки Седз-Яха).

По состоянию на 2 июля значимых изменений в характере смещений земной поверхности не произошло (рис. 6).

К 13 июля картина в целом осталась прежней (рис. 7). Однако, анализируя развитие смещений земной поверхности в период с 10 июня до 13 июля в значительном по площади ареале малых оседаний к западу от улицы Крайней, отметим последовательную интенсификацию оседаний на локальном участке в районе Таежной улицы, дом 226. Здесь оседания начались после 10 июня и к 13 июля достигли 1 см. Кроме того, в начале июля появился ареал малых оседаний в микрорайоне Дружба (дома № 2-5, 2-9 и 2-10).

К 24 июля (рис. 8) продолжают развиваться оседа-

ния в районе к западу от улицы Крайней. Новые очаги оседаний появляются также в районе зданий № 192 и 204 по Таежной улице. В остальном картина смещений остается прежней.

К 4 августа картина смещений земной поверхности значительно не меняется (рис. 9).

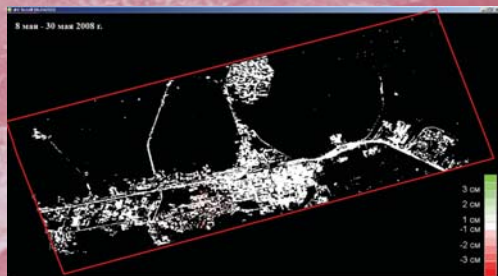


Рис. 3.
г. Новый Уренгой.
Смещения земной поверхности и деформации зданий и сооружений с 8 по 30 мая 2008 г.

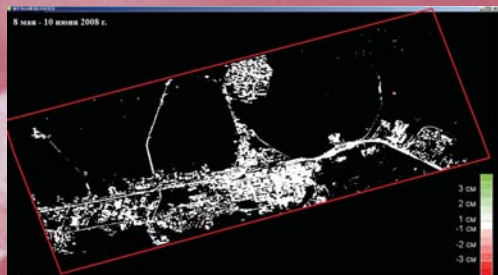


Рис. 4.
г. Новый Уренгой.
Смещения земной поверхности и деформации зданий и сооружений 10 июня 2008 г.

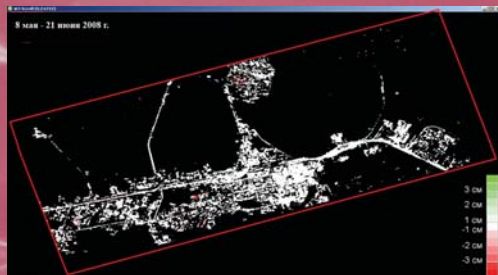


Рис. 5.
г. Новый Уренгой.
Смещения земной поверхности и деформации зданий и сооружений 21 июня 2008 г.

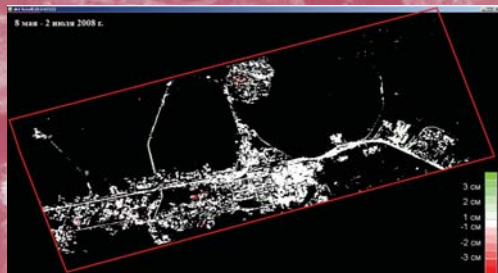


Рис. 6.
г. Новый Уренгой.
Смещения земной поверхности и деформации зданий и сооружений 2 июля 2008 г.

К 15 августа поле смещений земной поверхности изменяется незначительно (рис. 10), за исключением появления воздыманий малых амплитуд вокруг области оседаний в микрорайоне Мирный и трех новых очагов оседаний на юго-востоке города.

Рис. 7.
г. Новый Уренгой.
Смещения земной поверхности и деформации зданий и сооружений с 8 мая по 13 июля 2008 г.

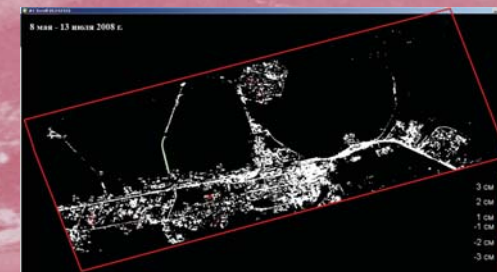


Рис. 8.
г. Новый Уренгой.
Смещения земной поверхности и деформации зданий и сооружений 24 июля 2008 г.



Рис. 9.
г. Новый Уренгой.
Смещения земной поверхности и деформации зданий и сооружений 4 августа 2008 г.

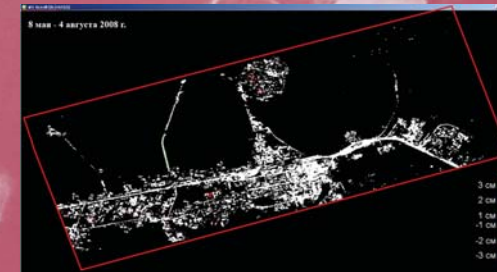
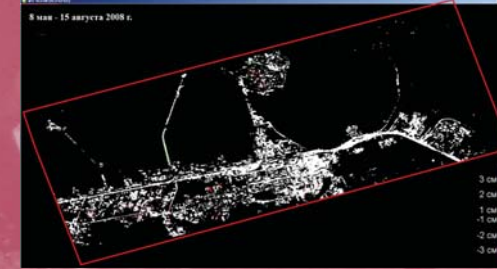


Рис. 10.
г. Новый Уренгой.
Смещения земной поверхности и деформации зданий и сооружений 15 августа 2008 г.



К 17 сентября в поле смещений земной поверхности значительных изменений не произошло (рис. 11).

К 28 сентября основные изменения произошли вокруг области оседаний в микрорайоне Мирный (рис. 12). Эта область оседаний продолжила оконтуриваться

воздыманиями в микрорайонах Советский и Восточный. Также заметим возникновение оседаний участка улицы Крайней от д. 16 до д. 28. Развивается локальный участок оседаний к западу от домов № 2, 4 и 6 по улице Глухарина.

Космоснимки, сделанные 9 и 20 октября, характеризуются недостаточной когерентностью по отношению к предшествующим снимкам интерферометрической цепочки, поэтому они были исключены из цикла обработки.

По состоянию на 31 октября основные изменения в поле смещений произошли на севере в микрорайоне

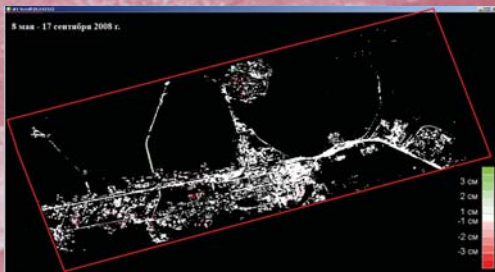


Рис. 11.
г. Новый Уренгой.
Смещения земной поверхности и деформации зданий и сооружений с 8 мая по 17 сентября 2008 г.

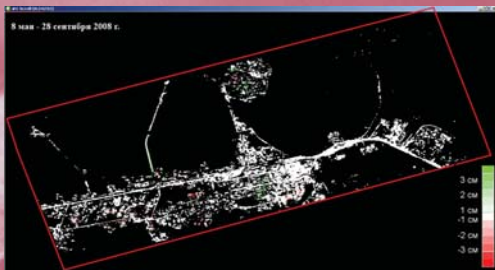


Рис. 12.
г. Новый Уренгой.
Смещения земной поверхности и деформации зданий и сооружений 28 сентября 2008 г.



Рис. 13.
г. Новый Уренгой.
Смещения земной поверхности и деформации зданий и сооружений 31 октября 2008 г.



Рис. 14.
г. Новый Уренгой.
Смещения земной поверхности и деформации зданий и сооружений 11 ноября 2008 г.

Мирный (рис. 13). Зона оседаний в этом микрорайоне постепенно сменяется воздыманиями.

По состоянию на 11 ноября оседания в микрорайоне Мирный продолжают сменяться воздыманиями (рис. 14). Эти изменения происходят от контура микрорайона к его центру.

После 11 ноября картина когерентности на снимаемой территории меняется. В частности, когерентность зданий и сооружений понизилась, а когерентность тундры повысилась. В итоге когерентность выровнялась в среднем по снимку, но с более низкими ее значениями, которые к тому же меняются со временем, что в целом приводит к снижению стабильности интерферометрической фазы и к снижению точности результатов наблюдений за смещениями. Обработка позднее-осенних, зимних и ранневесенних проходов положительного результата не дала.

Таким образом, наиболее статистически достоверные результаты мониторинга смещений земной поверхности и деформаций зданий и сооружений были получены за период с мая по ноябрь 2008 г. Смещения именно за этот период показаны на результирующей карте смещений земной поверхности, которая была вынесена на карту города с указанием названий улиц, номеров зданий и названий некоторых организаций. Объединение этих данных в геоинформационный проект, их взаимная привязка и оформление выполнялись в программном комплексе ArcGIS. Помимо зарегистри-

рованных смещений, как таковых, на результирующей карте смещений, также показаны ареалы оседаний и воздыманий, а также стабильные участки, являющиеся результатами авторской интерпретации зарегистрированных смещений (рис. 15).

Дополнительным подтверждением полученных результатов стали зарегистрированные воздымания четко в пределах автодорог в северо-западной и восточной частях города. В 2008 г. на эти дороги было уложено новое асфальтовое покрытие.

Для географической привязки результатов мониторинга смещений была использована карта г. Новый Уренгой, размещенная в открытом доступе на официальном интернет-сайте администрации города <http://newurengoy.ru>.

С зарегистрированными смещениями были ознакомлены представители нефтегазодобывающих предприятий и городской администрации. По результатам выполненных работ усовершенствована система наблюдений за смещениями и запланирован регулярный их мониторинг.

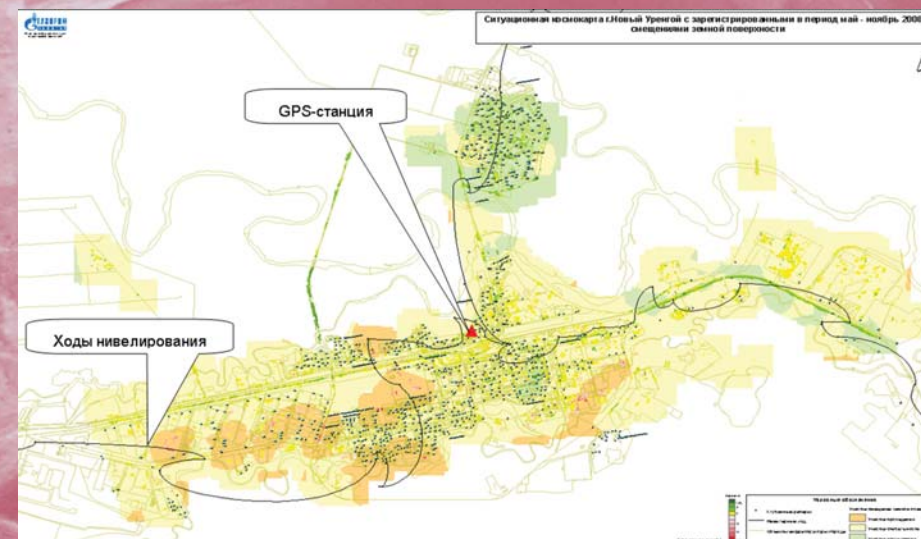


Рис. 15.
г. Новый Уренгой. Смещения земной поверхности и деформации зданий и сооружений с 8 мая по 11 ноября 2008 г. На рисунке показаны ареалы смещений земной поверхности (коричневым цветом – оседания, зеленым – воздымания, желтым – стабильные участки).