

## Мониторинг отклика системы водоносных горизонтов на закачивание и искусственное пополнение подземных вод. Monitoring aquifer-system response to groundwater pumping and artificial recharge

John W. Bell,<sup>1</sup> Falk Amelung,<sup>2</sup> Alessandro Ferretti,<sup>3</sup> Marco Bianchi<sup>3</sup> и Fabrizio Novali<sup>3\*</sup> представляют новый спутниковый метод для обнаружения и измерения долговременного и сезонного отклика системы водоносных горизонтов на закачивание и пополнение водных запасов, который потенциально может быть использован для мониторинга нефтяных и/или газовых резервуаров.

В этом исследовании мы представляем результаты опытного исследования в Las Vegas Valley, Nevada. Мы создали серию карт поля скоростей долины на периоды времени 1992-1996, 1996-2000 и 2003-2005, которые показывают, что, несмотря на возрастающий уровень воды, связанный с программой искусственного пополнения запасов (повторной загрузки) подземной воды, на нескольких участках долины продолжается длительное, остаточное, незластичное уплотнение системы водоносных горизонтов (проседание). На других участках, однако, длительное проседание остановилось, а местами поменяло направление на обратное. По долговременным трендам (направлениям изменения) были выделены сезонные отклики на периодические циклы закачивания и пополнения и проанализированы по пространственным и временным особенностям. Результаты показывают колебания, в которых максимальные сезонные отклики связаны с последними этапами годичных циклов искусственного пополнения запасов, и что сходные признаки сезонного проседания связаны с летними циклами закачивания.

### Задача и сфера рассмотрения

Многие бассейны подземных вод в засушливых и полусухих западных регионах Соединенных Штатов испытали уплотнение системы водоносных горизонтов, или проседание, в ответ на интенсивное закачивание. В этой статье мы исследуем процессы системы водоносных горизонтов, используя новый метод дистанционной регистрации, который становится все более и более распространенным, так как устройство для измерения явления поверхностной деформации охватывает обширные области. Программа исследований интерферометрического радара с синтезированной апертурой (InSAR) в сфере гидрогеологических проблем быстро продвинулась вперед в течение последнего десятилетия, и в настоящее время она регулярно применяется для широкого ряда задач, касающихся ресурсов подземной воды, включая моделирование течения подземной воды, оценку гидротехнических свойств системы водоносных горизонтов и усовершенствование рационального использования и воспроизведения источников подземной воды (Galloway and Hoffmann, 2006).

Применение в настоящее время запатентованного непрерывного рассеивателя InSAR (PSInSAR) предоставляет методологию, которая позволяет при большей разрешающей способности и точности выявлять движения земной поверхности, создаваемые откачиванием и пополнением системы водоносных горизонтов. В этой статье мы представляем результаты опытного исследования в Долине Лас Вегас (Bell et al., 2008), которое фокусируется на конфигурационном и временном отклике системы водоносных горизонтов на закачивание и искусственное

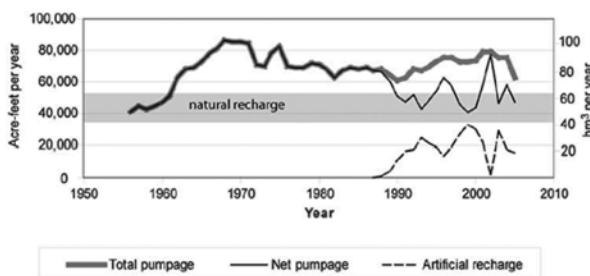


Рис. 1 Объем полного закачивания, пополнения запасов воды и результирующее закачивание в Долине Лас Вегас, 1950-2005 г.г. Программа пополнения водных запасов, запущенная водохозяйственным окружным управлением Долины Лас Вегас (LVVWD) в конце 1980-х годов, привела к ежегодному сокращению результирующего закачивания, кроме 2002 г. (Robert Coache, Инженерная Служба штата Невада, неопубликованные данные).

пополнение запасов воды. Мы представляем набор карт деформаций грунта, которые с большей разрешающей способностью смещения временной последовательности, чем раньше, позволяют использование стандартных InSAR. Анализ скорости и ускорения/замедления способствует тщательному исследованию особенностей проседания и воздымания, соответствующих поднятию уровня воды в течение исследуемого периода.

### Методология

Обычный, дифференциальный, спутниковый InSAR с повторным прохождением является методологией, в которой по двум радарным сценам одной и той же площади полученным в разное время находится фазовая информация, по которой можно измерить движение почвы амплитудой менее сантиметра в виде интерферограммы сдвига фаз. Успешное применение традиционного InSAR к исследованию деформации грунта обычно зависит от числа переменных параметров: пригодность данных архивного радара к диапазону временной диаграммы деформационного события; соответствующая геометрия спутниковой базы интерферометра (базовой линии); извлечение согласованных фазовых данных, определение и удаление фазовых изменений, не связанных с деформацией грунта, таких как топография, остаточные погрешности орбиты спутника и атмосферные артефакты (cf., Hanssen, 2001). Измерение фазового изменения радара осуществляется на базе с пиксельным разрешением (~80 м²) с полным циклом изменения фазы, эквивалентным половине длины волны радара (5.6 см для C-полосового радара) или 2.8 см смещения линии визирования радара (LOS).

<sup>1</sup> Nevada Bureau of Mines and Geology, University of Nevada, Reno, Nevada, USA.

<sup>2</sup> Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science, University of Miami, Miami, Florida, USA.

<sup>3</sup> Tele-Rilevamento Europa, Via Vittoria Colonna, Milan, Italy.

\* Corresponding author, E-mail: fabrizio.novali@treuropa.com.

## Геофизика окружающей среды и инженерная геофизика

Напротив, метод непрерывного рассеивателя (отражателя) (PS) использует установление и применение отдельных рефлекторов радара, или непрерывных рассеивателей, которые представляют ячейку с разрешающей способностью менее пикселя и которые остаются когерентными в течение длительного временного интервала, позволяя обнаружить смещение временных последовательностей (Ferretti et al., 2001). Разрешающая способность, полученная в результате установления этих PS элементов эффективно приводит к созданию набора данных, состоящих из многих крохотных меток. Достоинства методики PS следующие: 1) получена хорошая фазовая когерентность почти по всем радарным картинкам независимо от геометрии базовой линии (перпендикулярное разделение спутниковых позиций), и может быть выполнена интерферометрия длинной базовой линии с разделением вплоть до 1.6 км; 2) могут быть использованы все имеющиеся в архиве радарные съемки и 3) могут быть оценены и удалены из фазы деформационного сигнала вклады атмосферных фаз.

Подход, базирующийся на множестве интерферограмм, оптимально объединяющем более 20 радарных картинок используется для того, чтобы последовательно выявить когерентные объекты посредством всех временных последовательностей (рядов) и получить точные данные фазовых изменений для каждого объекта. Это облегчается использованием «управления нулевой базовой линии», которое оценивает геометрический фазовый вклад радарных картинок с различными базовыми линиями и исправляет эту фазовую компоненту соответственно эталонной картинке или картинке-«оригинала». Выявление устойчивых элементов, отражателей, выполняется по анализу временных последовательностей (рядов) радарных амплитудных значений, и по обзору устойчивых, ярких радарных отражателей, чаще всего обычно неподвижных V-образных структур, таких как здания или другие сходные объекты. Ложные сигналы фазового изменения (артефакты), обусловленные атмосферными вкладами, оцениваются посредством использования анализа атмосферного фазового экрана (APS). Вклады атмосферной фазы определяются для каждого радарного обнаружения и вычитаются из остаточной полной фазы, полученной при обработке интерферометрии.

## Методика

Для исследований имелись в распоряжении две независимые сети спутниковых данных, полученные Европейским управлением космических исследований (European Space Agency). Для анализа PS временных последовательностей (рядов) мы использовали 50 комплектов ERS-satellite с нисходящим треком над Долиной Лас Вегас между апрелем 1992 г. и августом 2000 г., и 19 комплектов ENVISAT-satellite (все комплекты ENVISAT на время исследования) с нисходящим треком между октябрём 2002 г. и маем 2005 г. После оценки APS и внесения поправок в каждый комплект, были обработаны два набора данных по алгоритму PSInSAR (Ferretti et al., 2001), чтобы извлечь фазовые данные деформации для каждого PS, вычислить смещение радарной линии визирования (LOS) каждой PS относительно «эталонных» комплектов (28 февраля 1997 г. для данных ERS и 27 февраля 2004 г. для данных ENVISAT), и получены поля средних скоростей по двум независимым наборам данных. Из-за крутизны (~23°) сектора обзора для радарных данных ERS и ENVISAT мы предполагаем, что измеренные смещения LOS вертикальные (cf., Hoffmann et al., 2001).

Сначала был проанализирован район в рамке 40 км на 40 км, содержащий в себе 500000 элементов PS (рис. 2). Заметны области проседания в Северо-западной Котловине Погружения (Northwest Subsidence Bowl (NWSB)) и вдоль меридиональной оси долины. Очень заметно сильное структурное влияние на карту поля скоростей с участками проседания, резко ограниченными разломами, что находится в хорошем соответствии с ранее полученными результатами обычного InSAR (Amelung et al., 1999; Hoffmann et al., 2001; Bell et al., 2002).

Подобласть 20 на 20 км, содержащая 90000 точек PS данных и расположенная в центре области нарушений NWSB-Eglington, выделена внутри рамки области, чтобы изучить более детально отклик системы водоносных горизонтов на временные вариации при закачивании и искусственном пополнении запасов воды (рис. 2). Эта область представляет самое большое проседание с 1960-х годов, хотя основные участки закачивания подземной воды и искусственного пополнения располагаются в прилегающей к югу области. Определены перемещения для PS точек (скачки, перемены давления) в области разлома Eglington, получены независимые временные последовательности для наборов данных ERS и ENVISAT, оценено нелинейное движение каждой временной последовательности (сезонные вариации) и построена карта средних скоростей перемещения. Были отобраны временные интервалы, чтобы исследовать тренды проседания, произошедшие в течение периодов 1992-1996 (самые высокие скорости проседания), 1996-2000 (пониженные скорости проседания) и

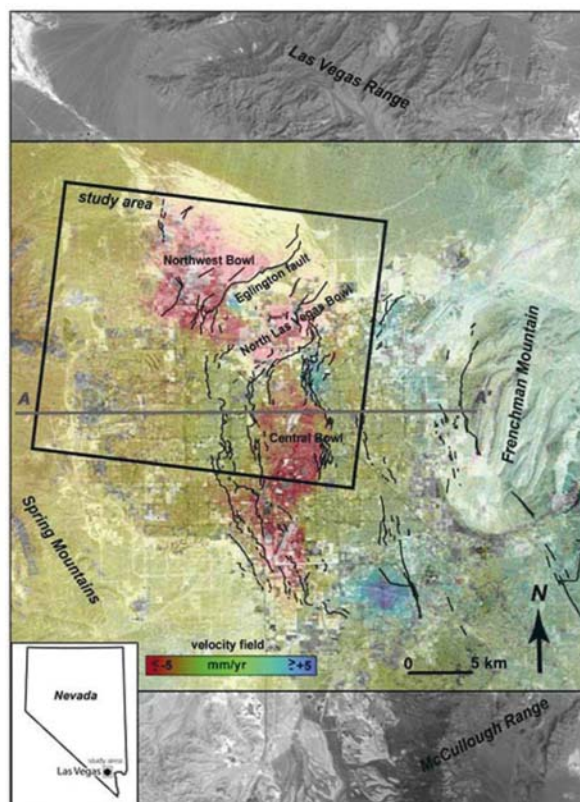


Рис. 2 Карта постоянной скорости на рассеивающем объекте в рамках области 40 X 40 км в Долине Лас Вегас за период 1996-2000 г.г., показывающая генерализованные скорости PS; красные области обозначают области проседания, а голубые – области воздымания. Общее число элементов PS в рамках области более 500000. Исследуемая область (вкладка) представляет небольшую подгруппу (90000 элементов) данных PS, покрывающую северо-западную часть долины.

## Геофизика окружающей среды и инженерная геофизика

2003-2005 (пониженные скорости проседания с самым большим подъемом уровня воды). Последующее временное сопоставление позволило оценить поле ускорения для временного периода, покрытого сетью данных ERS. Так как уровень воды в Долине Лас Вегас демонстрирует большие сезонные флуктуации, были отобраны периоды времени для согласования с сезонными колебаниями. Проанализированы отдельные временные последовательности PS по сезонным и долгосрочным трендам, чтобы выявить пространственные особенности и сравнить с флуктуациями уровня воды.

**Точность методологии**

Точность методологии PSInSAR может быть порядка миллиметров, если при анализе PS используется достаточное число комплектов. Вследствие большого временного промежутка между двумя наборами данных в нашем исследовании, комплекты ERS и ENVISAT не могут быть эффективно совместно обработаны, поэтому были созданы раздельные временные последовательности.

Чтобы оценить точность результатов PS для Долины Лас Вегас, мы сопоставили результаты с независимыми данными вертикального смещения по скважинным экстензометрам, полученными Геологической Службой Соединенных Штатов в NWSB (Pavelko, 2000). Рис. 3 показывает сопоставление между смещениями 1995-2005 г.г., зарегистрированными экстензометром на глубинах порядка 4-244 м (полное перемещение 45 мм) и данными временных последовательностей PS по объекту ERS (DW197) и объектом ENVISAT (BU292), примыкающим к экстензометру (рис. 4а). Между 1995 и 2000 г.г. перемещения PS повторяют сезонные и долгосрочные тренды экстензометра с точностью около 3-5 мм и средней скоростью долгосрочного PS, скорости уплотнения очень близки: 4.6 мм/а и 5 мм/а, соответственно. В аналогичном исследовании InSAR (Hoffmann et al. 2001) получены сезонные перемещения, которые больше результатов экстензометра, хотя долгосрочный тренд InSAR сопоставим с записью экстензометра. Они отнесены к сезонным перепадам, которые производят уплотнение под глубинами экстензометра в 244 м.

Наше сопоставление результатов PS и регистрации экстензометра показывают, что, хотя долгосрочные тренды их аналогичны, мы обнаруживаем меньшее варьирование сезонных изменений, чем описанные Hoffmann et al. (2001). Небольшая сеть данных ENVISAT показывает больше отражателей, чем большая сеть данных ERS, и средняя скорость проседания за 2002-2005 г.г. ниже, чем скорость уплотнения по экстензометру: 1.9 мм/а против 4.0 мм/а, соответственно. Мы расцениваем результаты ENVISAT как предварительные, содержащие больше неопределенностей, чем результаты ERS; неопределенности данных ENVISAT будут уменьшены, поскольку станет доступным большее число комплектов.

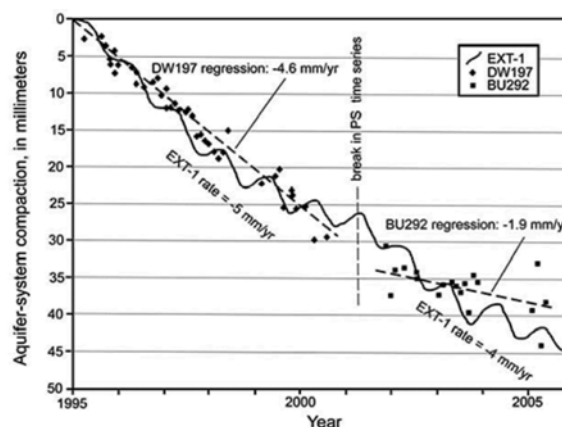


Рис. 3 Сопоставление уплотнения, зарегистрированного на скважинном экстензометре EXT-1 Геологической Службой США (см. положение на рис. 4), с результатами непрерывного рассеивания ERS за период 1995-2000 г.г. (PS элемент DW 197) и ENVISAT за период 2002-2005 г.г. (PS элемент BU 292). Так как две временные последовательности обработаны раздельно, имеется разрыв между данными ERS и ENVISAT. Скорости проседания рассчитаны по осредненным долгосрочным трендам регистрации экстензометра и по линейным регрессиям, рассчитанным по данным PS. (Данные экстензометра предоставлены М. Pavelko, Геологическая Служба США).

**Результаты и обсуждение**

*Скорости временных последовательностей и изменение уровня воды.* Результаты временных последовательностей были разделены в три временных интервала, чтобы сопоставить результаты ранних ERS (1992-1996), поздних ERS (1996-2000) и современных ENVISAT (2003-2005) с данными скважинного определения уровня воды для тех же периодов времени (рис. 4). Чтобы создать карту изменения уровня воды по исследуемому району, были использованы ежеквартальные данные уровня воды, полученные Водохозяйственным управлением Долины Лас-Вегас за 1992-1996 (50 скважин) и 1996-2000, 2003-2005 (100 скважин) периоды времени. Сопоставление трех временных интервалов показывает интенсивное падение скоростей временных последовательностей (пониженные скорости проседания), связанное с соответствующим возрастанием уровня воды.

Между весной 1992 г. и весной 1996 г. (рис. 4а) проседание в NWSB, имеющее место при максимальной средней скорости 2-3 см/а, согласуется с ранее проведенными интерпретациями стандартного InSAR и стандартных геодезических данных (Amelung et al., 1999; Bell et al., 2002). Уровень воды в течение этого периода вырос более чем на 10 м к югу от чаши проседания в области искусственного пополнения запасов воды, но продолжал падать на 5 м внутри чаши, указывая, что NWSB оставался зоной основного пополнения. Между весной 1996 г. и весной 2000 г. (рис. 4б) средние скорости в NWSB упали до 1-2 см/а, так как уровень воды продолжал расти на 10 м, в том числе и внутри NWSB. С весны 2003 г. до весны 2005 г. (рис. 4с) скорости максимального проседания в NWSB уменьшились до 5-10 мм/а, и все области показали поднятие уровня воды, кроме вновь созданной области в крайней северо-западной части исследуемой области.



## Геофизика окружающей среды и инженерная геофизика

Результаты PS показали, что NWSB оставался участком самого активного проседания системы водоносных горизонтов до 2005 г. Максимальные скорости проседания в NWSB до 1990 г. были порядка 5 см/а (Bell et al., 2002). Данные PS показали, что эти скорости уменьшились до менее 3 см/а в течение 1992-1996 г.г. (см. временные последовательности PS A, B, C и D на рис. 5).

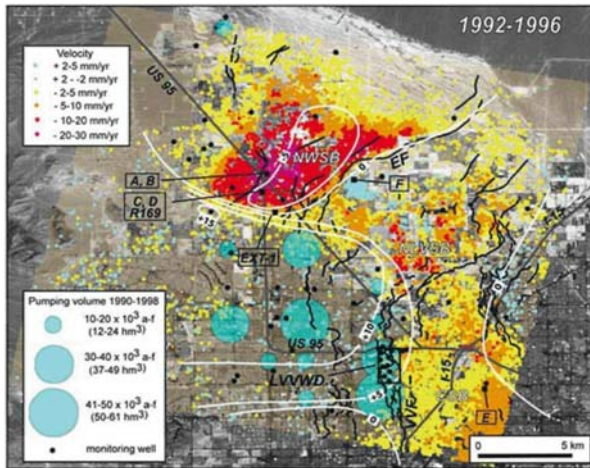


Рис. 4а Карта постоянной скорости рассеивающего объекта, показывающие скорости элементов в мм/а для исследуемой области в северо-западной части Долины Лас Вегас. На всех рисунках: NWSB (Северо-западная Чаша проседания); NLVSB (Северная чаша проседания Лас Вегас); CSB (Центральная чаша проседания); EF (разлом Eglinton); VVF (Долина видимого разлома); LVVWD (водохозяйственное окружное управление Долины Лас Вегас); EXT-1 (местоположения экстензометра). Изменение уровня воды показано белыми изолиниями в метрах, полученными по точкам данных уровня воды (черные точки). Полный набор данных элементов PS показан светло коричневыми точками со значениями от -1 до +2 мм/а; элементы PS, рассмотренные на рис. 5, обозначены буквами. Нарушения показаны черными линиями. (Данные уровня воды предоставлены LVVWD/Southern Nevada Water Authority). (а) Карта скорости непрерывного рассеивания по данным ERS на период с 21 апреля 1992 г. по 18 апреля 1996 г. и изменения уровня воды на период с марта 1992 г. по апрель 1996 г. Полное закачивание за период 1990-1998 г.г. показано светлоголубыми кружками (данные закачивания предоставлены Las VVWD/Southern Nevada Water Authority).

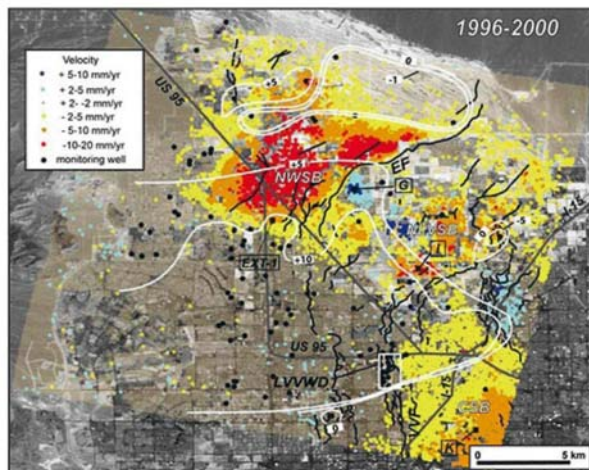


Рис. 4б Карта скорости рассеивающего объекта по данным ERS на период с 18 апреля 1996 г. по 28 апреля 2000 г. и изменения уровня воды на период с апреля 1996 г. по май 2000 г.

Результаты PS также показали, что отклик системы водоносных горизонтов в Северной чаше Лас Вегас противоположный, это единственная такая область, установленная нами до настоящего времени. Эта область проявила проседание на 60 см. Данные PS в чаше показали скорости остаточного проседания более 1 см/а между 1996 и 2000 г.г. (PS объект I; Рис. 5). Остаточное погружение к 2003-2005 г.г. прекратилось, и область испытала поднятие системы водоносных горизонтов со скоростью 1 см/а (PS объект J; Рис. 5). Объединенные временные последовательности 1992-1996-2000-2005 отражают постепенное падение скоростей проседания, что является основным результатом, сделанным нами в ранее проведенных исследованиях (Bell et al., 2002), но теперь это четко показано убывающими скоростями. На основании сопоставления изменения скорости ERS для одного и того же объекта между 1992-1996 и 1996-2000 периодами карта ускорений (рис. 6) показывает, что уплотнение системы водоносных горизонтов в трех основных чашах проседания замедлило среднюю скорость более чем на 1 мм/а<sup>2</sup>. Единственная небольшая площадь в северо-восточной части исследуемой области испытывает ускорение.

## Сезонные отклики системы водоносных горизонтов.

Большинство элементов PS, идентифицированных в исследуемой области, демонстрируют сезонные признаки, наложенные на долговременный тренд, включая области, демонстрирующие восстановление и воздымание (см. рис. 5). Чтобы распознать свойства сезонных откликов, мы выделили сезонные сигналы по амплитудам и временам года. Чтобы определить максимум сезонных амплитуд, мы сначала удалили известный, линейный долговременный тренд из каждой временной последовательности, а затем создали

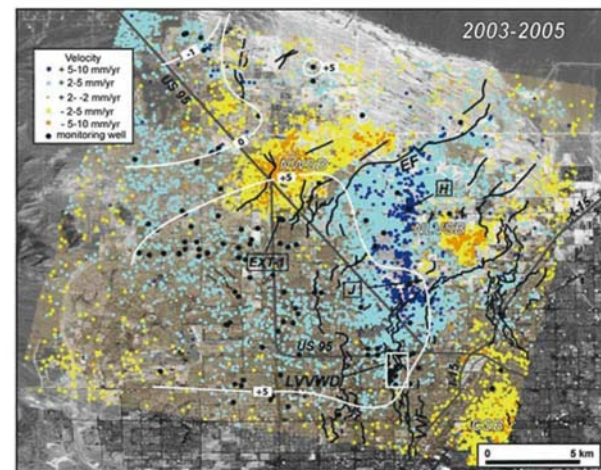


Рис. 4с Карта скорости рассеивающего объекта по данным ENVISAT на период с 18 апреля 2003 г. по 27 мая 2005 г. и изменения уровня воды на период с апреля 2003 г. по май 2005 г.

## Геофизика окружающей среды и инженерная геофизика

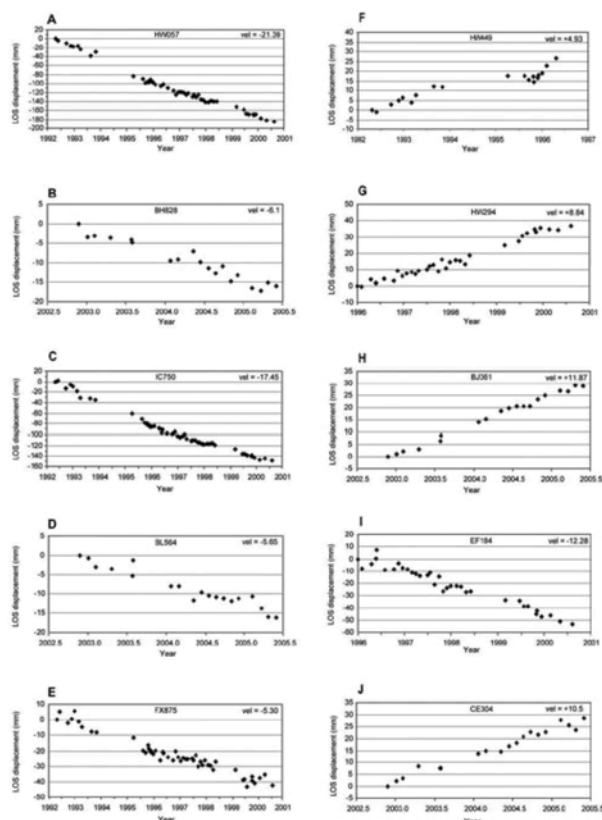


Рис. 5 Временные последовательности PS для выборочных точек данных проседания и воздымания (название элемента PS на каждой диаграмме) с рассчитанными осредненными скоростями долговременных точек (мм/а, определенными по линейной регрессии временных последовательностей. См рис. 4а, 4б для положения точек данных PS, идентифицированных на диаграммах А-Ж.

синусоидальную модель для каждой временной последовательности с удаленным трендом (Bell et al. 208):

$$Y(t) = Y_0 + \text{Amp} * \cos(2\pi(t - T)),$$

где Amp – максимальная сезонная амплитуда (мм) для каждого колебания проседания или поднятия, T – максимальная амплитуда времени года,  $Y_0$  значения при постоянном воздымании в модели, обусловленном шумом интерферометра и артефактами. Линейный тренд (рис. 7а) удален из временных последовательностей, и синусоидальная модель создана по остаточной последовательности для каждой временной последовательности (рис. 7б). Для сезонного анализа мы предполагаем одногодичную периодичность для движения грунта, основанную на годичных циклах закачивания и пополнения запасов воды. Составлена сезонная модель для каждого элемента по подсистеме данных ERS 1995-1998 г.г., которая содержит большинство точек устойчивых сезонных данных. Каждая временная последовательность была сначала отфильтрована осреднением всех элементов PS в радиусе 500 м, чтобы убрать шум и выделить области с самым активным сезонным откликом. Параметры модели были определены, изучая стандартную наименьшую среднеквадратичную оценку, и, чтобы найти пространственные и временные особенности, результаты были отсортированы по максимальной амплитуде (проседания или воздымания) и временам года.

Результаты показывают, что максимальный сезонный отклик группируется в четырех областях (рис. 8а). Область 1 расположена на северной окраине NWSB вблизи весенней зоны; область 2 расположена непосредственно к востоку от LVVWD, главного скважинного поля; область 3, которая показывает самые большие сезонные амплитуды, расположена в CSB; и область 4 расположена на восточной окраине NLVSB, прилегающей к новому полю для игры в гольф. Причины наличия этих групп и пространственное распределение не полностью ясны. На основании расположения скважин искусственного пополнения запасов воды, только область 2, примыкающая к LVVWD, имеет тесную пространственную связь с зоной пополнения запасов воды; другие группы находятся в 5-10 км от ближайшей скважины закачивания. Однако, в области 4, примыкающей к новому полю для игры в гольф, в 1997 г. началось закачивание (Bruce Wert, переписка., 2007), и она является единственной областью, которая показывает ускорение проседания (рис. 6). Каждая из групп максимальных сезонных амплитуд находится в области, которая подстилается мощным разрезом мелкозернистых отложений (Plume, 1984; Morgan and Dettinger, 1996). Поэтому мы предполагаем, что сезонные группы связаны с эластичным (упругим) откликом осадков внутри сжимаемой слабопроницаемой для воды последовательности.

Группы максимальных сезонных амплитуд в областях 1, 2 и 3 представлены с января по март ежегодно, показывая, что максимальные сезонные колебания связаны с заключительными стадиями искусственного пополнения водных запасов, которые обычно начинаются в конце октября и заканчиваются в конце марта ежегодно. В области 2 небольшая группа представлена в начале апреля на реальном окончании периода пополнения. Интересно отметить, что области 1 и 3 близко соответствуют сезонному пополнению, хотя пространственно отделены от скважин закачивания, наводя на мысль, что упругий отклик на пополнение довольно быстрый по всей системе водоносных

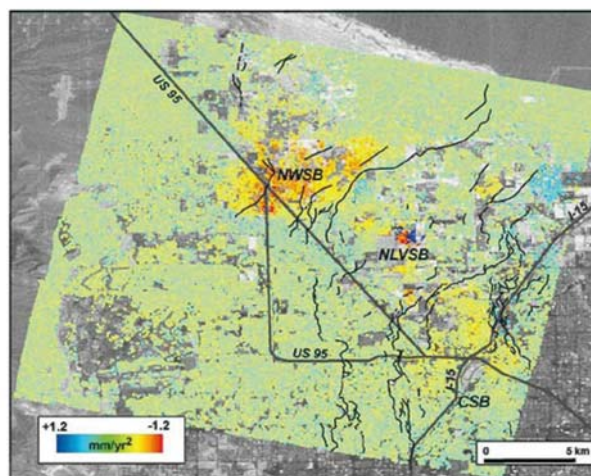


Рис. 6 Карта ускорения/замедления, полученная по сопоставлению данных временных последовательностей на периоды 1992-1996 г.г. и 1996-2000 г.г. На NWSB проявлено остаточное проседание, которое замедляется со скоростью  $-1 \text{ мм/а}^2$ , в то время как NLVSB и CSB почти стабильны. Нарушения показаны черными линиями.



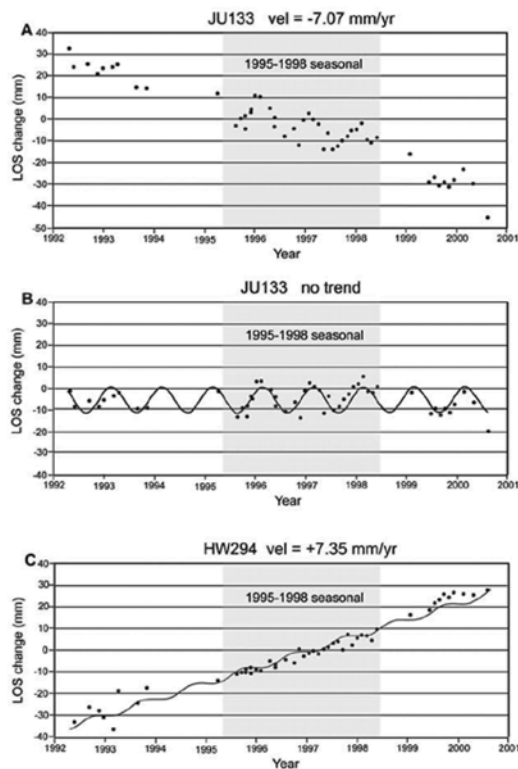


Рис. 7 Иллюстративный пример применения сезонной модели, объединяющей максимальную сезонную амплитуду и времена года для каждого элемента PS. (а) Временные последовательности элемента JU133 PS на период 1992-2000 г.г., показывающие линейный тренд проседания со скоростью -7.07 мм/а; положение точки К на рис. 5б. (б) Сезонная синусоидальная модель создана по результатам временных последовательностей объекта К после удаления длиннопериодного тренда проседания. (с) Сезонная модель по объекту воздымания G (рис. 4б, 5), показывающая сигнал сезонного воздымания, наложенный на длиннопериодное линейное воздымание со скоростью 7.35 мм/а.

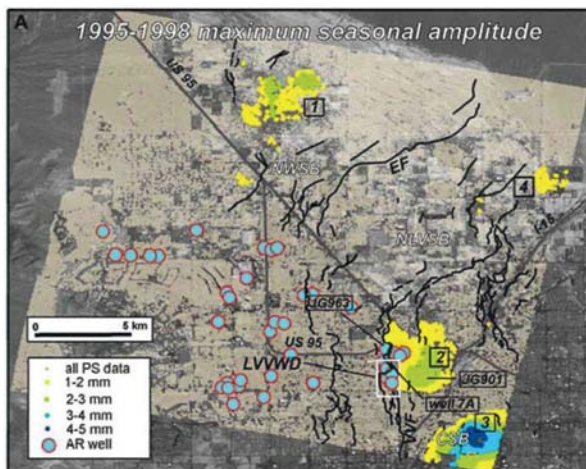


Рис. 8 Пространственные и временные особенности групп максимальных сезонных амплитуд, полученные в результате применения сезонной синусоидальной модели по всем элементам PS после пространственной фильтрации. Максимальные сезонные амплитуды раскрашены в соответствии с размером (мм). Представлены четыре группы (1, 2, 3 и 4) с самыми большими амплитудами, расположенные в группе 3 в CSB. Положение скважин искусственного пополнения водного запаса (AR) показано голубыми кружками. Элементы PS JG963 и JG901 расположены на западной и восточной стороне VVF, соответственно, а скважина 7а находится в пределах основного скважинного поля LVVWD.

горизонтов. В некоторых точках данных сезонные сигналы также наложены на обширный тренд воздымания в слабопроницаемом для воды слое (рис. 7с), показывая, что существуют коротко- и длиннопериодная компоненты упругого отклика. Так как водоупорные слои упруго растягиваются в силу длительного восстановления уровня воды, они также сезонно реагируют на периодическое закачивание и пополнение. Как отмечено выше, мы предполагаем, что быстрый сезонный отклик внутри системы последовательности водонепроницаемых слоев может быть обусловлен присутствием тонкозернистого ложа, которое реагирует подобно эластичному водоносному горизонту. Более совершенные результаты, основанные на моделировании водоносного горизонта, описаны в работе Bell et al. (2008). Способность данных PS делает возможным калибровать модель и проверить корреляцию между поведением системы водоносных горизонтов и перемещениями поверхности.

### Выводы

Эта работа использовала методологию PSInSAR совместно с детальными данными изменения уровня воды, чтобы исследовать временные и пространственные особенности сезонного и длительного отклика системы водоносных горизонтов на закачивание и пополнение запасов воды в Долине Лас Вегас, обеспечивая возможность проникнуть в суть важных аспектов отклика системы, создавая обоснование для аналогичных исследований в других бассейнах подземной воды с интенсивным закачиванием.

Это опытное исследование демонстрирует, что эта методология является устойчивой, с высокой способностью разрешения, и широко применимой методологией, которая усовершенствует обычные методы InSAR, давая возможность более полно охарактеризовать временные и пространственные особенности отклика системы водоносных горизонтов. Она в дальнейшем может быть усовершенствована увеличением частоты отсчетов и комбинированием данных по различным геометрическим построениям визуального отображения SAR и множеству спутников, давая возможность, таким образом, получить большую разрешающую способность годичных флуктуаций сезонных сигналов и определения горизонтальных перемещений водоносных горизонтов.

Мы полагаем, что эта развивающаяся методика обеспечит важную новую задачу в дальнейших поисках подземной воды и ее рациональном использовании и воспроизведении, что она может быть использована в других бассейнах подземной воды с интенсивным закачиванием на всей территории Соединенных Штатов и в любом другом месте. К тому же непрерывная методика рассеивания может иметь более широкое применение в гидрогеологическом исследовании за пределами поисков источников подземной воды, например, при естественном пополнении в городских районах и при анализе систем резервуаров других флюидов. Например, в отрасли нефти и газа (Vasco and Ferretti, 2005), данные PSInSAR могут характеризовать резервуарные процессы, такие как рост трещиноватости и изменения объема, на основании поверхностных деформаций, которые они генерируют, первичных, либо усиленных в результате добычи нефти, или истечения  $\text{CO}_2$ .

## Геофизика окружающей среды и инженерная геофизика

## Литература

- Amelung, F., D. L. Galloway, J. W. Bell, H. A. Zebker and R. J. Lacznik [1999] Sensing the ups and downs of Las Vegas: InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation. *Geology*, 27(6), 483-486.
- Bell, J. W., F. Amelung, A. Ferretti, M. Bianchi and F. Novalli [2008] Permanent scatterer InSAR reveals seasonal and long-term aquifer — system response to groundwater pumping and artificial recharge. *Water Resources Research*, Vol 44, W02407, doi: 10.1029/2007WR006152.
- Bell, J. W., F. Amelung, A. Ramelli and G. Blewitt [2002] Land subsidence in Las Vegas, Nevada, 1935-2000: New geodetic data show evolution, revised spatial patterns, and reduced rates. *Env. Eng. Geosci.*, VIII(3), 155-174.
- Ferretti, A., C. Prati and C. Rocca [2001] Permanent scatterers in SAR interferometry. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 39(1), 8—20.
- Ferretti, A., G. Savio, R. Barzaghi, A. Borghi, S. Musazzi, F. Novali, C. Prati and F. Rocca [2007] Sub-millimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 45(5), 1142-1153.
- Galloway, D. L. and J. Hoffmann [2006] The application of satellite differential SAR interferometry-derived ground displacements in hydrogeology. *Hydrogeol. J.*, doi:10.1007/s10040-006-0121-5.
- Hanssen, R. [2001] *Radar interferometry, Vol 2: Remote sensing and digital image processing*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Boston, London. 308 pp.
- Hoffmann, J. and H. A. Zebker [2003] Prospecting for horizontal surface displacements in Antelope Valley, California, using satellite radar interferometry. *J. Geophys. Res.*, 108(F1), 6011, doi:10.1029/2003JF000055.
- Hoffmann, J., H. A. Zebker, D. L. Galloway and E. Amelung [2001] Seasonal subsidence and rebound in Las Vegas Valley, Nevada, observed by synthetic aperture radar interferometry. *Water Resour. Res.*, 37(6), 1551-1566.
- Las Vegas Valley Water District [2005] 2005 Artificial recharge annual report. *Las Vegas Valley Water District*. Unpublished report, 150 pp.
- Morgan, D. S., and M. D. Dettinger [1996] Groundwater conditions in Las Vegas Valley, Clark County, Nevada, Part 2: Hydrogeology and simulation of groundwater flow. *US Geological Survey*, Water Supply Paper 2320-B, 124 pp.
- Pavelko, M. T. [2000] Ground water and aquifer-system compaction data from the Lorenzi Site, Las Vegas, Nevada, 1994-1999. *US Geological Survey*, Open-file Report 00-362, 26 pp.
- Plume, R. W. [1984] Ground-water conditions in Las Vegas Valley, Clark County, Nevada. *US Geological Survey*, Open-file Report 84-130, 25 pp.
- Vasco, D.W. and A. Ferretti [2005] On the use of quasi-static deformation to understand reservoir fluid flow. *Geophysics*, 70(4), 13-27.