

УДК 622.834

**ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ОСЕДАНИЯ ДНЕВНОЙ ПОВЕРХНОСТИ
ПРИ ВЫЕМКЕ ПОЛОГИХ УГОЛЬНЫХ ПЛАСТОВ**

Х. Ли¹, Ц. Цзен¹, Л. Сюэ^{2,3,4}, С. Чжао¹, С. Лэй¹, С. Гун¹

¹Исследовательская группа Сычуаньского инженерно-геологического института,
E-mail: lhscdd@outlook.com, г. Ченду, 610032, Китай

²Филиал геологической службы Китая, Ченду, 610081, Китай

³Технологический инновационный центр предотвращения и ликвидации геологических угроз,
Министерство природных ресурсов, г. Ченду, 611734, Китай

⁴Станция наблюдения и изучения геологических угроз, Министерство природных ресурсов,
г. Ченду, 610000, Китай

Рассмотрена проблема определения параметров оседания дневной поверхности при отработке угольного пласта методами традиционных вероятностных интегральных решений и усовершенствованного динамического прогнозирования. На основе генетического алгоритма разработана параметрическая модель деформации поверхности, включающая коэффициент оседания и мульду сдвижения. Установлена функция динамического прогнозирования, позволяющая получить полный профиль оседания поверхности и тренд динамического изменения области ведения горных работ. Результаты исследований показали, что динамическое прогнозирование совместно с генетическим алгоритмом обеспечивают достаточно высокую эффективность и точность установления параметров оседания поверхности при отработке угольного пласта. Исследование проводилось на примере горнодобывающего района в провинции Шаньси.

Вероятностный интегральный метод, динамическое прогнозирование, генетический алгоритм, инверсия, выемка, оседания поверхности, параметрическая модель, угольный пласт

DOI: 10.15372/FTPRPI20230421

Уголь — ключевой энергоресурс для промышленного развития. Угледобывающая отрасль вносит значительный вклад в формирование мировой экономики. Однако следует признать, что угледобыча сопровождается рядом негативных последствий [1]. В результате крупномасштабного и продолжительного недропользования наблюдаются оседание поверхности и обвалы налегающих пород, а также связанные с этим повреждения шахтной инфраструктуры и различные геологические катастрофические явления, которые несут угрозу зданиям, сооружениям и населению [2]. Например, в 2007 г. из-за оседания поверхности произошло повреждение подземного газопровода в районе угольной шахты Yangcheng Artemisiau в пров. Шаньси. На ликвидацию повреждения потребовались десятки миллионов юаней, а восстановление продолжалось два года. В 2015 г. по той же причине произошло повреждение газопровода в районе деревни Найроби, пров. Шаньси. Последующая операция по ликвидации аварии заняла три месяца и стоила более 5 млн юаней.

Разработка метода оценки рисков и прогнозирования угроз — актуальная задача для обеспечения безопасности трубопроводов, пролегающих в горнодобывающих районах. Технология интерферометрической радиолокации с синтезированной апертурой (InSAR) получила широкое распространение в горнодобывающей отрасли [3] благодаря способности к обнаружению сейсмических [4], деформационных [5], оползневых [6–7] и геологических [8] угроз на большой площади дневной поверхности. Тем не менее технология InSAR ограничена фиксированными характеристиками SAR-изображений, что приводит к низкой когерентности данных в центре участка, где оседания имеют максимальное значение. Подобная недостаточность точной информации о деформации в значительной степени ограничивает применение InSAR для решения практических инженерных задач [9].

Большой объем данных области оседания земной поверхности в горнодобывающем районе выполняется в два этапа. Сначала определяются параметры, затем проводится минимизация недостаточной когерентности данных, связанной с высокоградиентным оседанием. Среди многих методов получения и инвертирования параметров оседания поверхности в горнодобывающих районах наиболее эффективными являются алгоритмы параметрической инверсии, такие как гибридный алгоритм имитационного отжига [10], генетический алгоритм [11], хаотический алгоритм летучей мыши [12]. В рамках решения проблемы низкой когерентности данных высокоградиентного оседания в горнодобывающих районах исследовано комплексное применение технологии InSAR, PIM и временной функции Кноте. В работе [13] рассмотрено сочетание InSAR и PIM для определения границ оседания в горнодобывающем районе на основе продолжительного сбора данных с помощью системы географических координат и пространственной интерполяции. Разработана модель динамического прогнозирования оседания дневной поверхности на основе сочетания SBAS-InSAR (метод малых базовых линий), PIM и усовершенствованной временной функции Кноте [14]. Использована сегментарная функция Кноте и принцип суперпозиции для разработки модели динамического оседания грунта под горизонтальными угольными пластами с малым углом падения [15]. Однако в научных работах рассматриваются полностью выработанные районы добычи полезных ископаемых, и из-за собственных ограничений характеристик моделей требуется определение полных параметров PIM. Инверсия параметров оседания в условиях неполной подработки слабо изучена, моделей прогнозирования постепенного изменения поверхности недостаточно для подобных горнодобывающих районов.

В настоящей работе предлагается метод комплексного использования InSAR, PIM а также генетического алгоритма для параметрической инверсии и прогнозирования оседания в условиях неполной подработки. Для определения параметров оседания на основе данных InSAR выполнено усовершенствование PIM. Изменение параметров PIM определено с помощью инверсии на временных интервалах. Для прогнозирования риска оседания данные сопоставлялись с временной функцией.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Обработка информации о деформациях поверхности на основе InSAR. Технология интерферометрической радиолокации с синтезированной апертурой позволяет получать крупномасштабную информацию о деформациях поверхности с высокой точностью с помощью фазовых данных с двух и более SAR-изображений [16]. Технология InSAR может быть разделена на дифференциальную (D-InSAR) [17] и интервальную, или технологию временных серий (SBAS-InSAR и PS-InSAR — метод постоянных рассеивателей) [18–19]. Они характеризуются большой площадью покрытия, отсутствием требований к мониторинговым сетям, высоким про-

странственным разрешением, осуществлением мониторинга вне зависимости от времени суток и погоды, высокой точностью по сравнению с традиционными методами мониторинга деформации поверхности [20].

Метод SBAS-InSAR основан на использовании интерферометрических пар мультимастерных изображений для получения информации о деформациях на временных сериях большой площади на основе точек высокой когерентности [21]. На первом этапе проводится расчет линий SAR-изображений (трехмерные изображения создаются на основе нескольких двухмерных), покрывающих различные временные периоды в рассматриваемом регионе, определяются допустимые пороговые ограничения базовых линий для выбора интерферометрических пар. На втором этапе происходит дифференциальная обработка выбранных пар и их фазовая развертка. В соответствии с образованием подмножества свободно сочетающихся интерферограмм на третьем этапе методами наименьших квадратов или сингулярного разложения выполняется оценка параметров деформации всех интерферограмм, формируется фазовое уравнение.

В настоящей работе применяется временная фильтрация для устранения влияния атмосферных условий и отделения нелинейной деформации. Общая деформация в горнодобывающем районе складывается из совокупности оцененной низкочастотной и нелинейной деформаций. Это утверждение взято за основу инверсии параметров РИМ.

Вероятностный интегральный метод (PIM). Наиболее применяемый метод выявления функций влияния разработан в 1956 г. на основе теории стохастической модели горных пород, изучающей их сдвигение в несплошной среде [22]. Использованный в настоящей работе РИМ введен в 1960-х гг. [23].

$$W_e(x, y) = W_0 \iint_D \frac{1}{r^2} e^{-\frac{\pi[(x-s)^2 + (y-t)^2]}{r^2}} dsdt, \quad (1)$$

$$W_0 = Mq \cos \theta, \quad (2)$$

$$r = \frac{H}{\operatorname{tg} \beta}, \quad (3)$$

где $W_e(x, y)$ — окончательное значение оседания заданной точки (x, y) ; (s, t) — координаты очистного забоя; W_0 — максимальное значение оседания изучаемого района; M — мощность угольного пласта; q — коэффициент оседания; θ — угол падения угольного пласта; H — глубина отработки угольного пласта; $\operatorname{tg} \beta$ — тангенс угла мульды сдвижения; r — радиус мульды сдвижения по направлению простирания и падения; D — площадь горнодобывающего района. При отсутствии известных параметров инверсии подлежат следующие параметры: q , $\operatorname{tg} \beta$, θ , длина (L) и ширина (l) горнодобывающего района.

Генетический алгоритм — это поисковый алгоритм, в основе которого лежит механизм естественного отбора и популяционного наследования. Он моделирует размножение, скрещивание и мутацию заданной популяции [24]. В рамках решения проблемы инверсии параметров РИМ с помощью генетического алгоритма каждое решение параметра кодируется как “индивидуальная хромосома” (индивидуум). Несколько таких хромосом образуют популяцию. На начальном этапе использования генетического алгоритма некоторые индивидуумы (исходные решения) генерируются случайным образом. Затем происходит имитация отбора, скрещивания и мутации, которые способствуют постепенной эволюции индивидуумов до оптимального решения. Процесс представляет собой начальную эволюцию популяции, содержащую реализуемые решения, в результате которой можно получить инвертированные значения параметров РИМ. Данный процесс состоит из следующих этапов.

- Кодирование. Преобразование выражений в генотипы называется кодированием. Генетический алгоритм представляет данные в пространстве решений в форме генотипных строковых данных, различные комбинации которых составляют различные точки.

- Генерация начальной популяции. Изначальные строковые данные генерируются случайным образом. Каждый набор строковых данных именуется индивидуумом. N-ное количество индивидуумов образует популяцию, которая является отправной точкой дальнейшего анализа.

- Оценка приспособленности. Функция приспособленности позволяет рассчитать соответствие каждого индивидуума своей популяции. Функция соответствия определяется исходя из решаемой задачи.

- Отбор. Оператор отбора используется для выявления превосходящих индивидуумов в популяции. Индивидуумы с наибольшими значениями соответствия будут перенесены в популяцию следующего поколения с большей вероятностью. В рамках данного процесса значения соответствия индивидуумов в популяции непрерывно стремятся к оптимальному решению параметров РИМ.

- Скрещивание. Операция скрещивания выполняется для комбинирования гомологичных хромосом в новые, что приводит к появлению новых индивидуумов. “Потомство”, сгенерированное в результате скрещивания, наследует базовые “родительские” характеристики и приближается к оптимальному решению.

- Мутация. Операция мутации выполняется для изменения одной или нескольких позиций в строке кода индивидуума с малой вероятностью создания нового индивидуума. Данная операция позволяет предотвратить потерю некоторой информации в ходе отбора и скрещивания, а также обеспечить эффективность составленного генетического алгоритма.

- Остановка. Если эволюционный процесс удовлетворяет предустановленным условиям, то индивидуумы с максимальным значением соответствия принимаются оптимальным решением, из которого выводятся результаты инверсии параметров РИМ.

Инверсия параметров РИМ на основе генетического алгоритма. Постепенное оседание дневной поверхности над шахтной выработкой — проблема для традиционной инверсии параметров РИМ. Для ее решения в настоящей работе проведено усовершенствование модели РИМ с помощью генетического алгоритма на основе данных SBAS-InSAR. После определения параметров РИМ выполнена их аппроксимация и анализ для прогнозирования оседания поверхности в горнодобывающем районе и создания системы раннего оповещения. Инверсия параметров РИМ включает в себя следующие операции (рис. 1):

- 1) получение SBAS-InSAR изображений, выполнение их фазовой развертки и определение информации о точке PS (точка постоянных рассеивателей) для горнодобывающего района, которая является основой дальнейшей параметрической инверсии;

- 2) оценка параметров зоны выемки (l , L , m , H , q , $\operatorname{tg}\beta$, и θ) на основе информации о деформации поверхности путем соотнесения параметров РИМ с выбранными периодами времени;

- 3) генерация начальных хромосом с помощью генетического алгоритма и получение нового поколения данных. Используются операции отбора, скрещивания и мутации;

- 4) расчет значений соответствия для каждого поколения и регистрация значений параметров горнодобывающего района;

- 5) повторение операций 3 и 4 до достижения оптимального решения;

- 6) объединение оптимального решения инверсии параметров РИМ с сегментарной временной функцией, прогнозирование изменения поверхности в выбранные периоды и определение момента времени, при котором горнодобывающая деятельность окажет воздействие на поверхностные объекты.

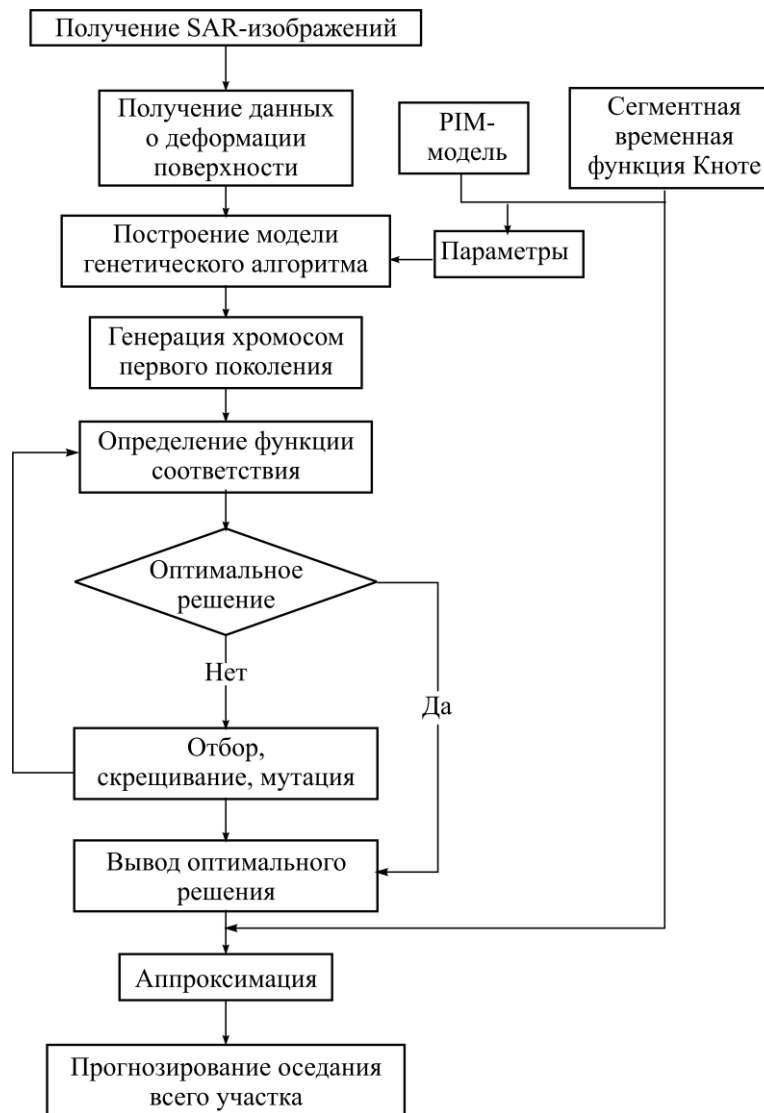


Рис. 1. Инверсия параметров ПРИМ и прогнозирование оседания дневной поверхности на основе генетического алгоритма

ИМИТАЦИОННЫЕ ИСПЫТАНИЯ

С целью проверки эффективности генетического алгоритма для инверсии параметров ПРИМ симитирован гипотетический горнодобывающий район с действующей подземной выработкой. Предположено, что добыча осуществляется на глубине $H=300$ м, длина района $L=1000$ м, ширина $l=200$ м, мощность пласта составляет 1.5 м, угол падения пласта $\theta=10^\circ$. Гипотетическая добыча осуществлялась согласно основному закону ПРИМ. Рассчитанные параметры горного оседания получили следующие значения: $q=0.9$; $\text{tg}\beta=2.0$. Оседание поверхности рассчитано с помощью ПРИМ. Окончательные значения параметров ПРИМ приняты фактическими значениями деформации, относительно которых рассчитано отклонение спрогнозированных. Для моделирования параметров оседания использован генетический алгоритм.

Количество генетических поколений установлено на значении 20, коэффициент вариации составил 0.7. Диапазоны инверсии каждого параметра определены в следующих границах: $L \in [500, 1.500]$, $l \in [100, 800]$, $q \in [0.3, 1]$, $\text{tg}\beta \in [1, 3]$, $m \in [1, 10]$, $\theta \in [0, 80]$, $H \in [50, 1.000]$. Значения параметров имитационных испытаний представлены в табл. 1.

ТАБЛИЦА 1. Инверсия экспериментальных и прогнозных параметров и их отклонения

Значение	L , м	l , м	m , м	H , м	q	$\text{tg}\beta$	θ , град
Фактическое	1.000	200	1.5	300	0.9	2.0	10
Спрогнозированное	997.98	202.64	1.51	301.50	0.89	1.96	9.98
Отклонение, %	0.202	1.32	0.67	0.50	1.11	2.00	0.20

Согласно полученным в ходе имитационных испытаний данным, построена модель оседания поверхности (рис. 2).

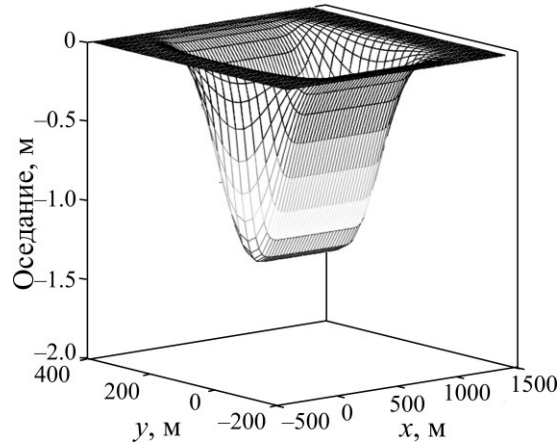


Рис. 2. Прогнозирование оседания дневной поверхности

Результаты инверсии всех параметров показали высокую точность. Наибольшее отклонение 2 % характерно для $\text{tg}\beta$. Согласно РИМ, максимальное значение оседания выработки составило $M = m \times q \times \cos\theta = 1.329$ м; максимальное значение оседания, полученное в результате имитационных испытаний — 1.294 м; отклонение от теоретического значения — 2.67%. Таким образом, параметрическая инверсия на основе РИМ и генетического алгоритма является реализуемым и надежным способом прогнозирования оседания, который может быть использован при решении практических инженерных задач.

ОПЫТ ПРИМЕНЕНИЯ

Объект исследования. Район угледобычи Цинчи расположен в пров. Шаньси (Китай). Из-за труднодоступности данной территории известны только следующие параметры: глубина залегания угольного пласта 300–350 м, мощность около 3 м, угол падения 3°. На SAR-изображениях наблюдается очевидное оседание поверхности. Участок угледобычи имеет неравномерную овальную форму, покрыт растительностью. Территория относится к области выветренного низкогогорья водораздела Циншуй с диапазоном изменения высот 650–890 м. За пределами района выемки расположены фабрики, жилые районы, дороги и другие инфраструктурные объекты.

О месторождении Вуцзя, расположенном в 7.6 км от района Цинчи, имеется полная горно-техническая информация. Земная поверхность находится в полностью устойчивом состоянии, процесс оседания данной территории завершен. Параметры оседания — коэффициент оседания 0.61 и тангенс угла мульды сдвижения 1.932 — могут быть использованы для проверки параметров оседания района Цинчи ввиду близкого расположения районов друг к другу.

Сбор и обработка данных InSAR. В качестве основной технологии мониторинга района использован метод SBAS-InSAR на основе изображений со спутника Sentinel-1A, полученных с октября 2020 г. по июль 2021 г. На рис. 3 представлено развитие деформации поверхности горнодобывающего района. Область оседания постепенно увеличивается по площади и в объеме (от серых оттенков к более темным); данный район находится в состоянии непрерывного оседания поверхности.

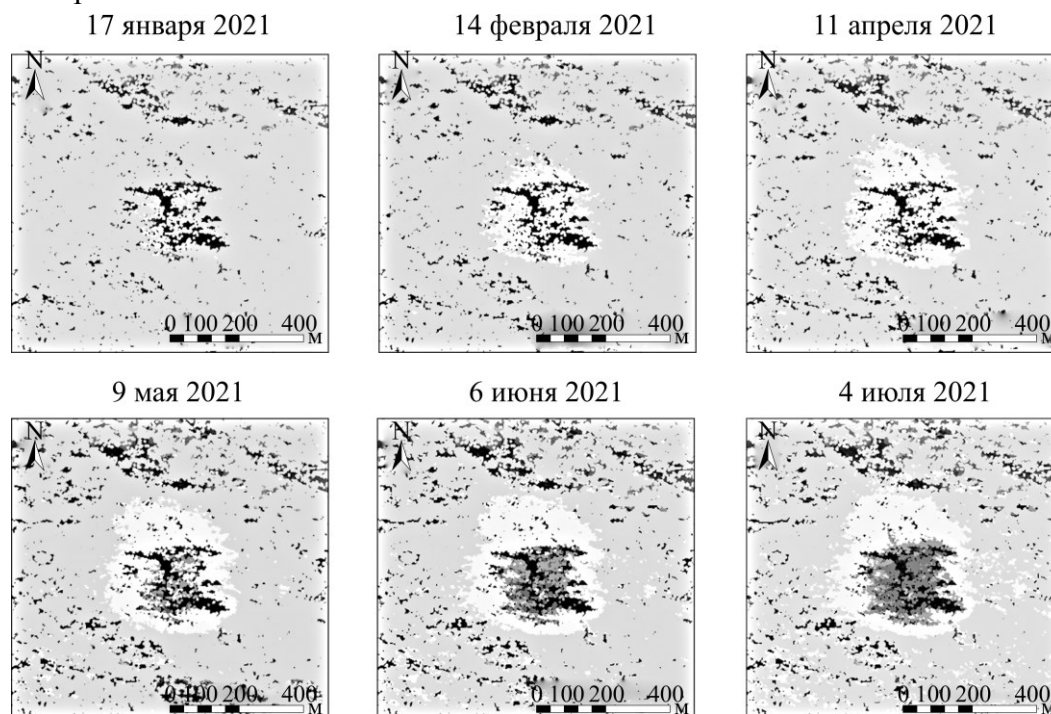


Рис. 3. Развитие деформации земной поверхности в районе Цинчи

Инверсия параметров оседания. Параметрическая инверсия выполнена на основе данных по оседанию. Рассматриваемый район на текущий момент времени находится на стадии предварительной добычи, поэтому параметры оседания РИМ определены в период с октября 2020 г. по июль 2021 г. Выполнена аппроксимация параметров РИМ и рассчитана тенденция их изменения, а также установлены паттерны изменения поверхности.

Район находится на стадии непрерывного оседания и параметры оседания окончательно неизвестны, поэтому точность инверсии может быть снижена, а результаты инверсии примут нестандартные значения. Следовательно, для обеспечения требуемой точности прогнозирования инверсией известные параметры должны быть собраны в максимально осуществимом объеме. На основе доступной информации получены известные параметры: $m = 3$ м, $H = 325$ м, $\theta = 3^\circ$. С помощью РИМ инвертированы параметры: q , $\operatorname{tg}\beta$, L и l . Диапазон поиска каждого параметра определен исходя из наблюдений по горнодобывающему району (табл. 2).

Значения оседания поверхности с каждого SAR-изображения использованы в качестве данных параметрической инверсии для получения тренда изменения рассматриваемых параметров, которые впоследствии были аппроксимированы. Для проверки точности инверсии и аппроксимации окончательные результаты соотносились с фактическими параметрами оседания района Вуцзя.

ТАБЛИЦА 2. Диапазон параметрической инверсии

Дата наблюдения InSAR*	L , м	l , м	q	$tg\beta$
20.12.2020	55 – 75	25 – 45	0.55 – 0.85	1.92 – 2.40
17.01.2021	70 – 90	40 – 60		
14.02.2021	85 – 105	55 – 75		
14.03.2021	100 – 130	70 – 90		
11.04.2021	115 – 135	85 – 105		
09.05.2021	130 – 150	100 – 120		
06.06.2021	145 – 165	115 – 135		
04.07.2021	160 – 180	130 – 150		

* Начальная дата наблюдения 22.11.2020

Результаты параметрической инверсии

Для инвертирования параметров РИМ, соответствующих каждому SAR-изображению, данные из табл. 2 подставлялись в модель параметрической инверсии. Наилучшие результаты инверсии q , $tg\beta$, L и l приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3. Результаты инверсии параметров РИМ

Дата наблюдения InSAR	Продолжительность наблюдений, сут	L , м	l , м	q	$tg\beta$
20.12.2020	28	69.25	40.27	0.5409	1.9295
17.01.2021	56	70.17	56.67	0.5416	1.9327
14.02.2021	84	93.65	74.94	0.5437	1.9223
14.03.2021	112	105.48	85.25	0.5528	1.9324
11.04.2021	140	115.22	103.97	0.5518	1.9231
09.05.2021	168	130.16	117.39	0.5729	1.9235
06.06.2021	196	150.28	128.71	0.5839	1.9234
04.07.2021	224	160.95	132.28	0.5857	1.9258

По результатам инверсии создавались карты оседания земной поверхности (рис. 4).

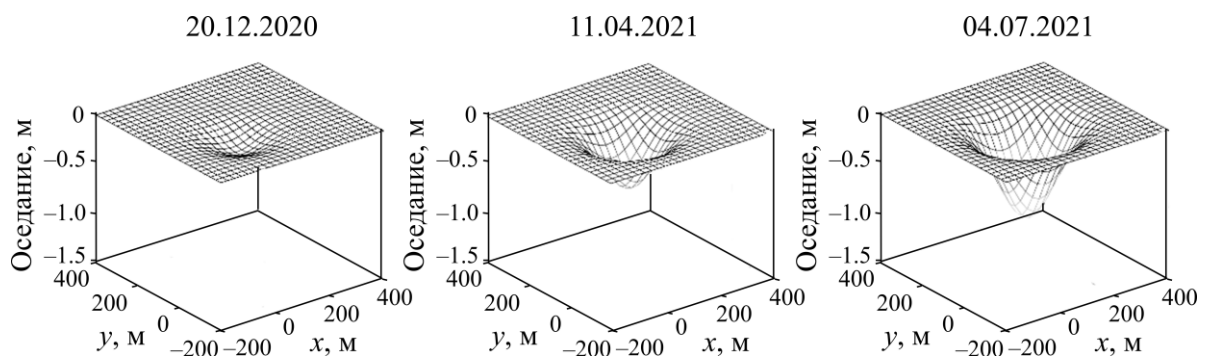


Рис. 4. Карты оседания земной поверхности

Изменения значений q , $\operatorname{tg}\beta$, L и l в зависимости от времени представлены на рис. 5.

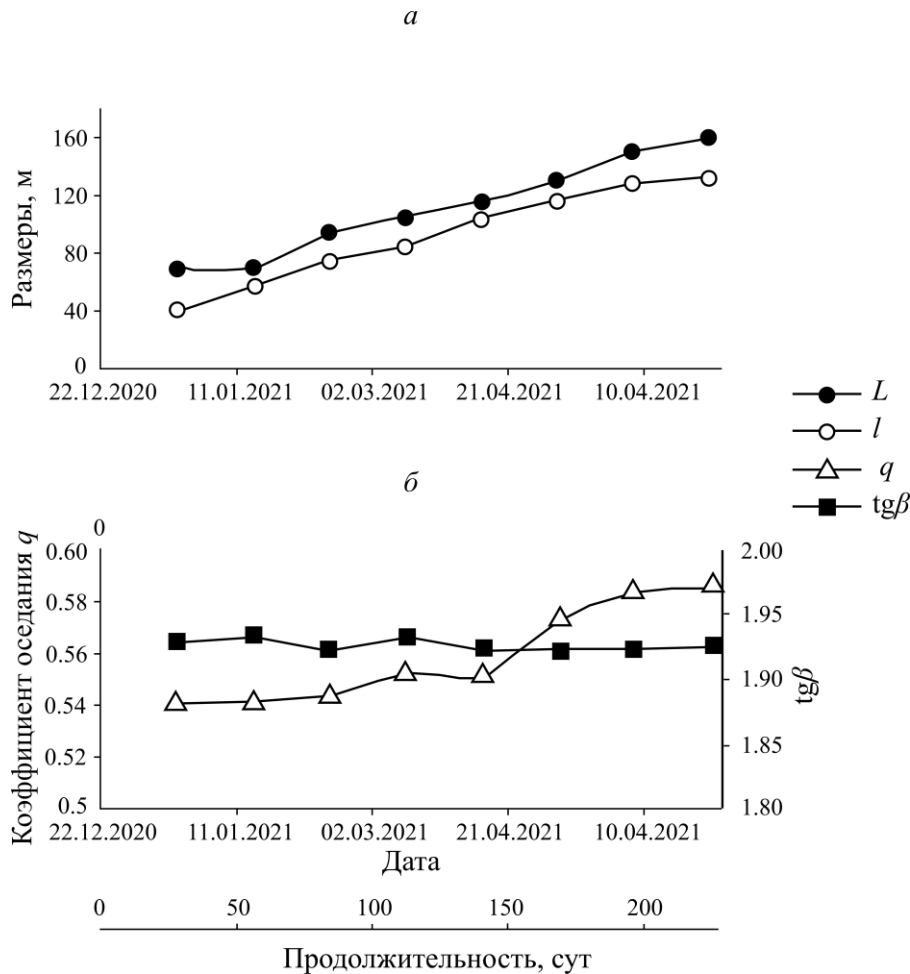


Рис. 5. Изменения длины и ширины района отработки (а), а также коэффициента оседания и тангенса угла мульды сдвига (б) в зависимости от времени

Прогнозирование параметров. Для получения изменения оседания поверхности спрогнозированные значения параметров проанализированы вероятностным интегральным методом РИМ.

Граница района горнодобычи заранее не определена. При нормальных условиях отработки месторождения примем, что длина будет изменяться равномерно и функция длины района по простиранию забоя определится как функция времени 1-го порядка:

$$L = 0.494t + 49.66, \quad (4)$$

где t — продолжительность горных работ, сут (рис. 5а).

Как показано на рис. 5, ширина горнодобывающего района меньше длины и достигает проектного значения за более короткий промежуток времени. Изменение кривой аппроксимации ширины района можно описать следующей функцией:

$$l = \frac{228.55}{\pi} \operatorname{arctg}(0.0083t - 0.678) + 71.57. \quad (5)$$

Кривая аппроксимации коэффициента оседания имеет S-образную форму (рис. 5б), следовательно изменение коэффициента оседания определяется следующей функцией:

$$q = \frac{0.053}{\pi} \arctg(0.043t - 6.82) + 0.5659. \quad (6)$$

Тангенс угла мульды сдвижения колеблется в диапазоне 1.9223–1.9295 (рис. 5б), поэтому для каждой стадии принято среднее значение, которое составило 1.927.

Спрогнозированные согласно (4)–(6) параметры РИМ представлены в табл. 4. Так как цикл наблюдения InSAR составляет 28 дней, то временными отметками продолжительности наблюдений являются 252-й день, 280-й день и т. д.

ТАБЛИЦА 4. Спрогнозированные значения параметров РИМ

Дата	t , сут	L , м	l , м	q	$tg\beta$
01.08.2021	252	174.15	141.05	0.5867	1.927
29.08.2021	280	187.98	146.13	0.5882	
26.09.2021	308	201.81	150.26	0.5892	
24.10.2021	336	215.64	153.66	0.5897	
21.11.2021	363	228.98	156.41	0.5902	
19.12.2021	392	243.31	158.90	0.5904	
16.01.2022	420	257.14	160.96	0.5907	
13.02.2022	448	270.97	162.73	0.5910	
13.03.2022	476	284.80	164.27	0.5911	
10.04.2022	504	298.63	165.84	0.5912	
08.05.2022	532	312.46	167.03	0.5913	
05.06.2022	560	326.30	168.08	0.5914	
03.07.2022	588	340.13	169.03	0.5914	
31.07.2022	616	353.96	169.88	0.5915	
28.08.2022	644	367.79	170.65	0.5915	
25.09.2022	672	381.62	171.35	0.5916	
23.10.2022	700	395.46	171.99	0.5916	
20.11.2022	728	409.29	172.57	0.5917	
18.12.2022	756	423.12	173.11	0.5917	
15.01.2023	784	436.95	173.61	0.5917	

При постоянном увеличении длины и ширины района коэффициент оседания изменяется сначала быстро, затем медленно и окончательно принимает постоянное значение 0.5917. Согласно результатам параметрической инверсии (табл. 4), $tg\beta$ имеет относительно постоянное значение на средней отметке 1.927, т. е. не зависит от продолжительности добычи и расстояния проходки.

Параметры оседания горнодобывающего района Вуцзя использованы как проверочные. Коэффициент оседания данного района составляет 0.61, $tg\beta$ — 1.932. Полученное отклонение коэффициента оседания составляет 3.0%, а отклонение $tg\beta$ — 0.26%, что можно охарактеризовать как низкие значения. Следовательно, результаты параметрической инверсии являются корректными.

По спрогнозированным данным, оседание поверхности постепенно увеличивается со временем, достигая максимального значения 1.3451 м на 10.04.2022 (рис. 6). Исходя из значения оседания в каждой точке, можно сделать прогноз для всего участка и оценить общий тренд сдвижения и степень риска для зданий и сооружений.

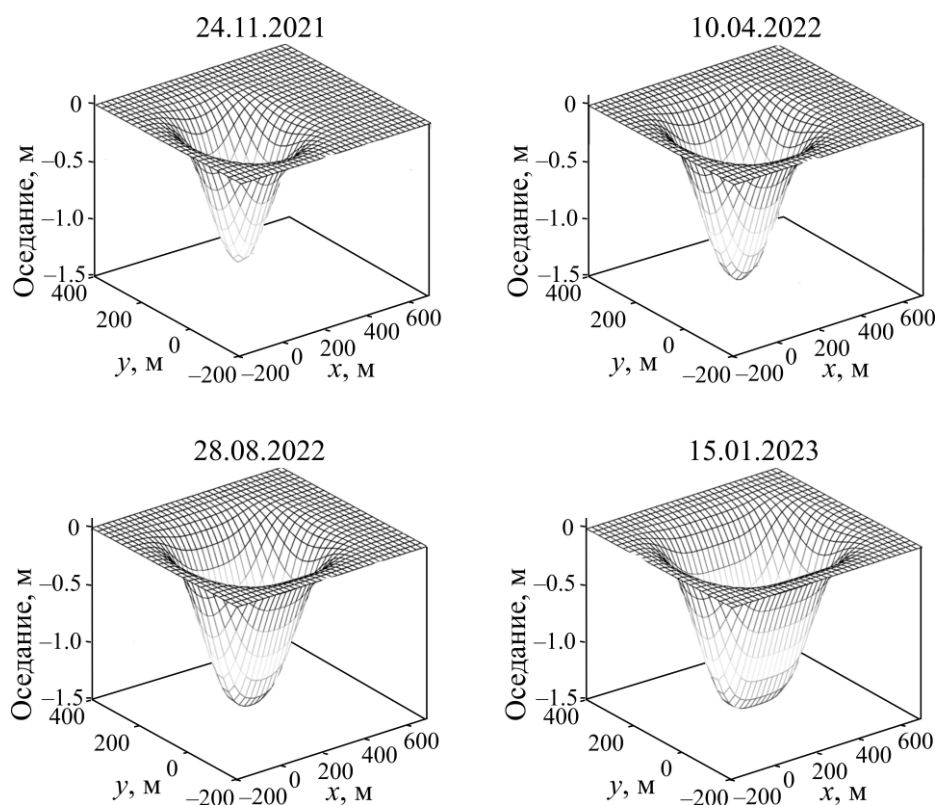


Рис. 6. Спрогнозированное оседание земной поверхности

Результаты параметрической инверсии помогут спрогнозировать влияние подземной добычи на окружающую среду и расположенные рядом здания и сооружения.

ВЫВОДЫ

Предложен метод динамического прогнозирования параметров оседания и поведения дневной поверхности при отработке угольного месторождения с целью решения проблемы контроля и управления сдвижением массива пород в горнодобывающих районах. Комбинация генетического алгоритма и вероятностного интегрального метода позволяет эффективно и с достаточно высокой точностью определять параметры добычи при выемке угольных месторождений.

На примере горнодобывающего района Цинчи в пров. Шаньси прогнозирование параметров смещения поверхности показало медленное изменение коэффициента оседания и тангенса угла мульды сдвижения, которые принимают фиксированные значения по завершении добычи, что компенсирует неприменимость вероятностного интегрального метода при подземной разработке месторождений.

Параметрическая модель, отражающая оседание дневной поверхности, обеспечивает основу оценки рисков при эксплуатации сооружений наземной производственной и социальной инфраструктуры.

Авторы работы благодарят Национальный фонд естественных наук Китая (№ 42230311) за финансовую поддержку настоящего исследования, компанию West-East Gas Transmission Pipeline Co. Ltd. за обеспечение исходной геологической информацией и Европейское космическое агентство за предоставление снимков со спутника Sentinel-1A, а также редакторов и рецензентов за ценные замечания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Fan H. D., Li T. T., Gao Y. T., Deng K. Z., and Wu H. G.** Characteristics inversion of underground goaf based on InSAR techniques and PIM, *Int. J. Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2021, Vol. 103.
2. **Chen Y., Tao Q., Liu G., Wang L. Y., Wang F. Y., and Wang K.** A refined monitoring method for surface subsidence in mining areas by combining InSAR and probabilistic integration method, *J. Geophysics*, 2021, Vol. 64, No. 10. — P. 3554–3566.
3. **Fan H., Gao X., Yang J., Deng K., and Yu Y.** Monitoring mining subsidence using a combination of phase-stacking and offset-tracking methods. *Remote Sens*, 2015, Vol. 7, No. 7. — P. 9166–9183.
4. **Gaudreau É., Nissen E. K., Bergman E. A., Benz H. M., Tan F., and Karasözen E.** The August 2018 Kaktovik earthquakes: active tectonics in northeastern Alaska revealed with InSAR and seismology, *Geophys. Res. Lett.*, 2019, Vol. 46, No. 24. — P. 14412–14420.
5. **Lundgren P. R., Bagnardi M., and Dietterich H.** Topographic changes during the 2018 Kilauea eruption from single-pass airborne InSAR, *Geophys. Res. Lett.*, 2019, Vol. 46, No. 16. — P. 9554–9562.
6. **Bianchini S., Herrera G., Mateos R., Notti D., Garcia I., Mora O., and Moretti S.** Landslide activity maps generation by means of persistent scatterer interferometry, *Remote Sens.*, 2013, Vol. 5, No. 12. — P. 6198–6222.
7. **Herrera G., Gutiérrez F., García-Davalillo J. C., Guerrero J., Notti D., Galve J. P., Fernández-Merodo J. A., and Cooksley G.** Multi-sensor advanced DInSAR monitoring of very slow landslides: The Tena Valley case study (Central Spanish Pyrenees), *Remote Sens. Environ.*, 2013, Vol. 128, No. 21. — P. 31–43.
8. **Anantrasirichai N., Biggs J., Kelevitz K., Sadeghi Z., Wright T., Thompson J., Achim A. M., and Bull D.** Detecting ground deformation in the built environment using sparse satellite InSAR data with a convolutional Neural Network, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2020, Vol. 59, No. 4. — 2940–2950.
9. **Ng A., Chang H.C., Ge L.L., Rizos C., and Omura M.** Assessment of radar interferometry performance for ground subsidence monitoring due to underground mining, *Earth Planets Space*, 2009, Vol. 61, No. 6. — P. 733–745.
10. **Yang Z., Li Z., Zhu J., Yi H., Feng G., Hu J., Wu L., Preusse A., Wang Y., and Papst M.** Locating and defining underground goaf caused by coal mining from space-borne SAR interferometry, *ISPRS J. Photogramm. Remote. Sens.*, 2018, Vol. 135. — P. 112–126.
11. **Leung T. W., Chi K. C., and Troutt M. D.** Application of a mixed simulated annealing-genetic algorithm heuristic for the two-dimensional orthogonal packing problem, *Eur. J. Oper. Res.*, 2003, Vol. 145, No. 3. — P. 530–542.
12. **Mahdavi S., Rahnamayan S., and Deb K.** Opposition based learning: a literature review. *Swarm Evol. Comput*, 2018, Vol. 39. — P. 1–23.
13. **Chen Y., Tao Q., Liu G., Wang L. Y., Wang F. Y., and Wang K.** A refined monitoring method for surface subsidence in mining areas by combining InSAR and probabilistic integration method, *J. Geophysics*, 2021, Vol. 64, No. 10. — P. 3554–3566.
14. **Zhang T.** Research on subsidence monitoring and dynamic prediction of mining area based on SBAS-InSAR, Master's/PhD Dissertation, Xi'an University of Sci. and Technol, 2021.
15. **Zhang P. and Li H.** Dynamic mechanical properties of buried pipes in mining areas based on segmental Knothe function, *J. Applied Mechanics*, 2021, Vol. 38, No. 1. — P. 128–135.
16. **Ferretti A., Savio G., and Barzaghi R.** Submillimeter accuracy of InSAR time series: Experimental validation, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2007, Vol. 45, No. 5. — P. 1142–1153.

17. **Chen Y., Yu S., Tao Q., Liu G., Wang L., and Wang F.** Accuracy verification and correction of D-InSAR and SBAS-InSAR in monitoring mining surface subsidence, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, No. 21. — P. 4365.
18. **Ferretti A., Prati C., and Rocca F.** Permanent scatterers in SAR interferometry, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2001, Vol. 39, No. 1. — P. 8–20.
19. **Berardino P., Fornaro G., Lanari R., and Sansosti E.** A new algorithm for surface deformation monitoring based on small baseline differential SAR interferograms, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 2002, Vol. 40, No. 11. — P. 2375–2383.
20. **Dong L., Wang C., Tang Y. X., Tang F. Q., Zhang H., Wang J., and Duan W.** Time series InSAR three-dimensional displacement inversion model of coal mining areas based on symmetrical features of mining subsidence, *Remote Sensing*, 2021, Vol. 13, No. 11. — P. 2143–2143.
21. **Anjasmara I. A., Yulyta S. A., and Taufik M.** Application of time series InSAR (SBAS) method using Sentinel-1A data for land subsidence detection in Surabaya City, *Int. J. Advanced Sci., Eng. and Information Technol.*, 2020, Vol. 10, No. 1. — P. 191–197.
22. **Law of the People's Republic of China on the protection of oil and gas pipelines**, *Selected Judicial Practice*, 2010, Vol. 25. — P. 3–14.
23. **Liu B. C. and Dai H. Y.** Origin and research progress of probability integral method, *Coal Mining Tech.*, 2016, Vol. 21— P. 1–3.
24. **Li J., Yu X., Liang Y., and Chi S.** Parameter solving of probability integral method based on improved genetic algorithm, *Tehnički vjesnik*, 2021, Vol. 28, No. 2. — P. 515–522.

Поступила в редакцию 12/I 2023

После доработки 31/V 2023

Принята к публикации 30/VI 2023