

УДК 004.9:622.1:622.83

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССОВ СДВИЖЕНИЙ ПО ЦИФРОВЫМ МОДЕЛЯМ РЕЛЬЕФА ПРИ РАЗРАБОТКЕ ХИБИНСКИХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ АПАТИТ-НЕФЕЛИНОВЫХ РУД

Е. С. ЖЕРЛЫГИНА¹, старший научный сотрудник, канд. техн. наук,
Zherlygina_ES@pers.spmi.ru

М. Г. МУСТАФИН¹, зав. кафедрой, д-р техн. наук

Б. Ю. ВАСИЛЬЕВ¹, аспирант-исследователь

Р. В. НИКОЛАЕВ², главный маркшейдер

¹ Научный центр геомеханики и проблем горного производства,
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия
² Кировский филиал АО «Апатит», ПАО «ФосАгро», Кировск, Россия

На примере разработки хибинских месторождений апатит-нефелиновых руд рассмотрено применение цифровых моделей рельефа для определения расчетных параметров процессов сдвижения.

Ключевые слова: цифровая модель рельефа, параметры процесса сдвижения, маркшейдерский мониторинг, методы пространственной интерполяции, облако точек, воздушное лазерное сканирование

DOI: 10.17580/gzh.2023.05.14

Введение

Маркшейдерские наблюдения за сдвижением земной поверхности и за подрабатываемыми объектами проводят с целью определения и дальнейшего уточнения параметров процесса сдвижения, фиксирования вида и размера деформаций, возникающих в подрабатываемых объектах.

Для наблюдения за деформациями поверхности применяют различные методы: интерферометрию [1–3], фотограмметрию [4], а также классические инструментальные методы наблюдений.

При маркшейдерском мониторинге используют наблюдательные станции – сеть реперов, заложенных на земной поверхности над проектируемыми горными работами, в фундаментах (цоколях) зданий или на различных инженерных объектах. Это так называемый классический метод выполнения мониторинга, при котором определяют высотные отметки (ВО) реперов. В дальнейшем, зная ВО, можно рассчитать линейные параметры процессов сдвижения, такие как оседания η , наклоны i и кривизну K , которыми, в свою очередь, определяются угловые параметры, необходимые для понимания формы и размера зон сдвижения [5–7].

Однако существуют условия, при которых отсутствует возможность организации вышеописанных наблюдений классическим методом, например при добыче полезного ископаемого по системе разработки с обрушением покрывающих пород [8]. Тогда для оценки деформационных процессов на земной поверхности применяют методы, альтернативные классическим. Авторы рассматривают метод введения условных реперов. В данном подходе точки (условные реперы) располагают на поверхности – цифровой модели рельефа (ЦМР), полученной при обработке результатов лазерного сканирования (облака точек), а их ВО определяют координатой Z . Плановые координаты (X , Y) у точек, рассматриваемых за разные временные интервалы, должны

быть одинаковыми. Получить координаты точек с поверхностей можно в любом программном обеспечении [9], которое поддерживает формат работы с подобными данными. Далее определить оседания η одного условного репера можно путем вычитания ВО, полученных с поверхностей за разные периоды съемок. Наклоны i и кривизна K между условными реперами рассчитывают по классическим для данных величин формулам.

Достоверность определения линейных параметров сдвижения в данном случае напрямую зависит от метода построения ЦМР.

На данном этапе развития информационных технологий во многих областях активно применяют моделирование как способ построения максимально приближенного к реальности объекта или процесса, как правило, для целей дальнейшего анализа [10–12].

В настоящее время построение ЦМР, а также плотности исходного набора данных [13], отображающей исследуемую поверхность как наилучшее приближение к действительной, активно изучают [14–16]. Исходными данными для моделирования являются данные съемок с беспилотных летательных аппаратов [17, 18] и воздушных лазерных систем [19]. Информационные технологии [20, 21] позволяют также комбинировать несколько источников информации [22].

Построение ЦМР, в том числе для прогнозирования сдвижений и деформаций земной поверхности [23], осуществляют при помощи различных методов пространственной интерполяции. Безопасность ведения работ является необходимым критерием в современной практике предприятий минерально-сырьевого комплекса в рамках устойчивого развития [24–26].

Качество построения ЦМР как источника точной геопространственной информации [27–29] на выбранном участке,

в том числе с исправлением высот по локальным моделям геоидов [30], напрямую зависит от его выбора [31–33]. Авторы работ [34–36] отмечают целесообразность применения следующих методов пространственной интерполяции для построения ЦМР [37–39]:

- обратное расстояние [40];
- естественный сосед [41, 42];
- триангуляция [43, 44];
- кригинг [45];
- минимальная кривизна.

Таким образом, любой участок земной поверхности – это новый объект для исследования [46], анализируя который можно сделать выводы о применении методов пространственной интерполяции для построения ЦМР на примере ограниченного участка местности.

Ниже описан опыт применения методики при разработке полезных ископаемых в сложных условиях.

Описание методики

Методика построения цифровых моделей рельефа

В качестве исходных данных были использованы результаты воздушного лазерного сканирования за период с 2015 по 2020 г. на двух горнодобывающих предприятиях: Расвумчоррском и Кукисвумчоррском рудниках.

Данные были классифицированы при помощи инструментов TerraSolid TerraScan и разделены на два набора:

- точки для построения ЦМР, описывающие основную геометрию;
- точки, относящиеся к поверхности рассматриваемого объекта, но не включенные в первый набор данных.

Затем были построены цифровые модели рельефа в программе Microstation для ручной доработки автоматической классификации, пример такого построения приведен на **рис. 1, а**.

Дальнейшие построения ЦМР выполняли в программе Surfer от Golden Software с пространственным разрешением 3 м (см. **рис. 1, б**) следующими методами пространственной интерполяции: триангуляция; минимальная кривизна; естественный сосед; обратное расстояние; кригинг.

Методика определения линейных параметров процессов сдвижения

По полученным цифровым моделям рельефа, методы построения и оценки которых представлены выше, в программе Autodesk AutoCAD были построены поверхности. На **рис. 2** представлено изображение поверхностей Кукисвумчоррского месторождения.

Используя поверхности, были построены разрезы по линиям координатной сетки в программе Rhinoceros 6.

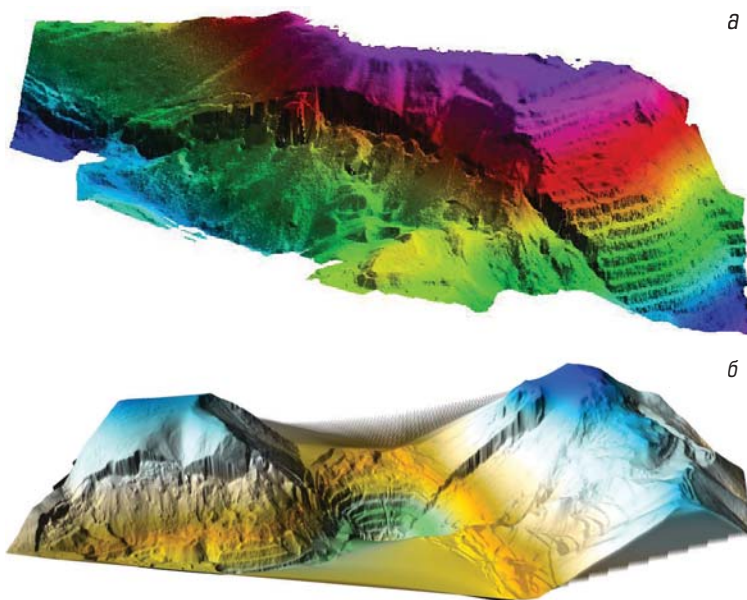


Рис. 1. Примеры построенных ЦМР:

а – в программе Microstation, Расвумчоррский рудник;

б – в программе Surfer, Кукисвумчоррский рудник

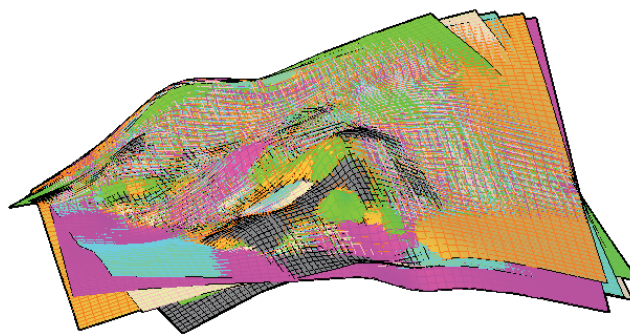


Рис. 2. Изображение построенных поверхностей изменения рельефа в результате осуществления горных работ на Кукисвумчоррском месторождении

На **рис. 3** показано построение разрезов по линиям P16 и P18 Кукисвумчоррского месторождения.

На примере разреза по линии P16 (**рис. 4**) были условно обозначены реперы через каждые 20 м, по направлению от юго-запада к северо-востоку, нумерация от 1 до 51 (**рис. 5**).

Высотные отметки положения этих реперов были определены путем экспорта данных точек из программы Rhinoceros 6, в которой они, в свою очередь, были получены с контуров разрезов поверхностей, приведенных выше. Величины оседаний условных реперов, так же, как и последующие значения наклонов и кривизны, были определены поочередно за интервалы времени: 2015–2016, 2015–2017, 2015–2018,

2015–2019 гг. Расчеты проводили по формулам, приведенным в инструкции [47]. Это было реализовано для выявления критических величин наклонов и кривизны (наклоны $i = 4 \cdot 10^{-3}$, кривизна $K = 0,2 \cdot 10^{-3}$).

Обсуждение результатов

Оценка точности построения цифровых моделей рельефа по данным периодических съемок

Оценку точности построений выполняли по среднеквадратическому отклонению (СКО) значениям минимального и максимального отклонений, а также по их размаху.

В **таблице** приведены значения оцениваемых параметров для рудников за период с 2015 по 2020 г.

Авторы отмечают метод «кригинг» для построения ЦМР на Расвумчоррском руднике по данным съемки за период с 2015 по 2020 г. В большинстве случаев все оцениваемые параметры здесь оказались наименьшими из проанализированных методов, а также для всех моделей значение СКО, полученное при применении данного метода при построении ЦМР, оказалось наименьшим. Данное утверждение не изменялось ни при увеличении плотности сканирования, ни при незначительном изменении площади сканируемой поверхности.

Для построения цифровых моделей рельефа по данным периодических съемок за рассматриваемый период на Кукисвумчоррском руднике наименьшее значение СКО было получено при применении метода «Кригинг». Авторы подчеркивают, что топографическая поверхность рудника не была изменена в значительной степени в части морфологических характеристик за период наблюдений, но содержит элементы антропогенного влияния на рельеф. Важно отметить, что методы «триангуляция» и «естественный сосед» при низком значении СКО приводили к значительному значению размаха, например в 2018 и 2019 гг.

На **рис. 6** приведена сводная информация по полученным значениям СКО для всех оцениваемых построений при помощи методов пространственной интерполяции за период с 2015 по 2020 г. на Расвумчоррском и Кукисвумчоррском рудниках.

За рассматриваемый период четко прослеживается, что на Расвумчоррском руднике наименьшее значение СКО получено при применении метода «кригинг». Методы «триангуляция» и «естественный сосед» по значению СКО приблизительно равны.

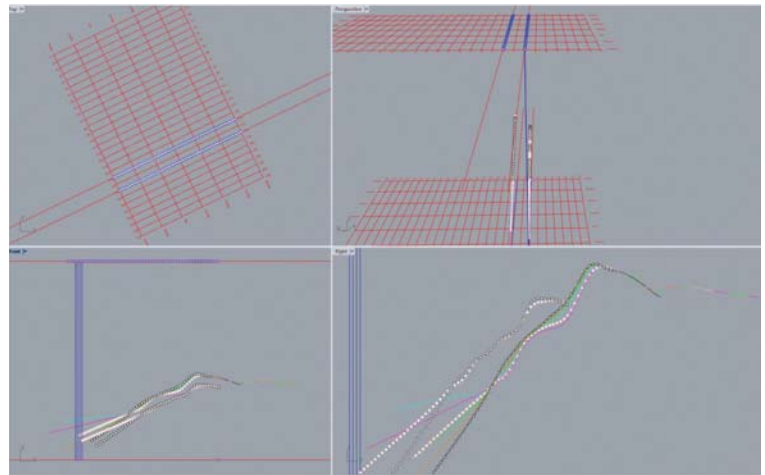


Рис. 3. Изображение построенных разрезов по линиям P16 и P18 Кукисвумчоррского месторождения

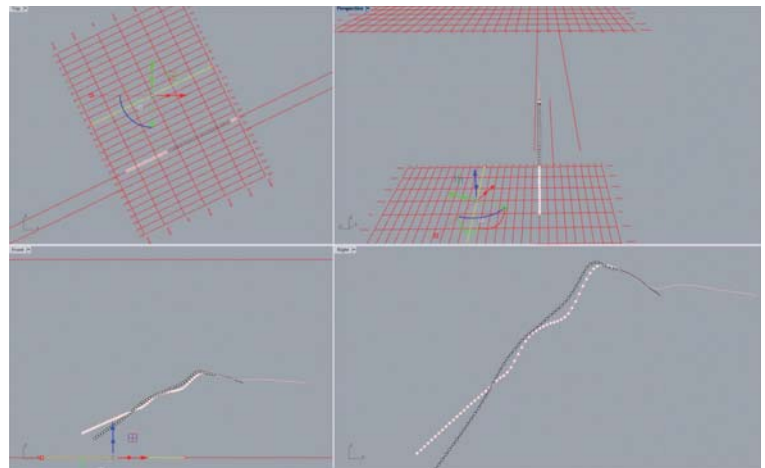


Рис. 4. Изображение разреза по линии P16 Кукисвумчоррского месторождения

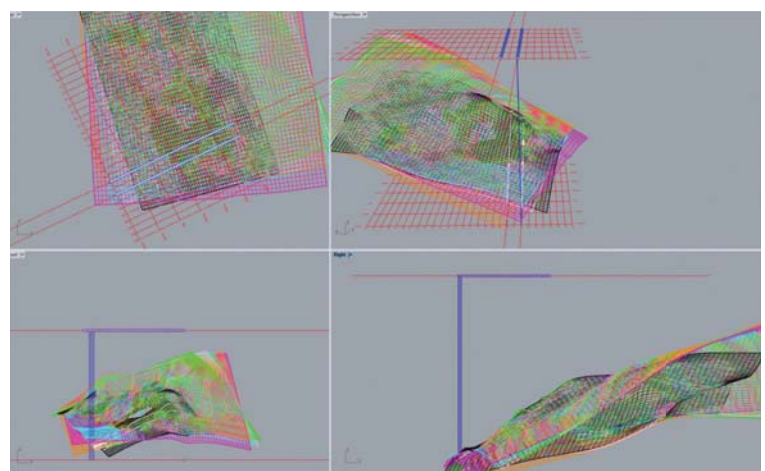


Рис. 5. Расположение условных реперов на разрезе по линии P16 Кукисвумчоррского месторождения

Оценка точности построения цифровой модели на рудниках по данным съемки за период с 2015 по 2020 г.

Метод	Минимальное отклонение, м	Максимальное отклонение, м	Размах отклонений, м	СКО
<i>2015 г.</i>				
Триангуляция	-19,40	14,53	33,93	0,35
	-35,60	19,94	55,54	0,38
Минимальная кривизна	-21,58	60,23	81,82	0,53
Естественный сосед	-41,83	144,15	185,97	0,55
Обратное расстояние	-19,44	14,12	33,56	0,34
	-36,58	20,22	56,80	0,38
Кригинг	-21,07	28,97	50,04	0,48
	23,12	30,11	53,24	0,49
	-17,18	14,03	31,21	0,31
	-18,79	20,96	39,76	0,36
<i>2016 г.</i>				
Триангуляция	-13,66	10,89	24,55	0,39
	-22,57	25,96	48,53	0,31
Минимальная кривизна	-16,53	11,08	27,61	0,43
Естественный сосед	-60,99	119,30	180,29	0,44
Обратное расстояние	-13,49	11,12	24,61	0,39
	-18,51	27,56	46,07	0,30
Кригинг	-12,75	15,58	28,33	0,46
	-23,63	42,63	66,26	0,41
	-14,49	11,00	25,49	0,34
	-15,02	33,92	48,94	0,28
<i>2017 г.</i>				
Триангуляция	-22,47	17,88	40,36	0,42
	-18,92	25,54	44,46	0,38
Минимальная кривизна	-26,95	31,01	57,97	0,52
Естественный сосед	-59,97	76,33	136,30	0,49
Обратное расстояние	-22,21	17,65	39,86	0,41
	-18,45	22,85	41,30	0,38
Кригинг	-28,09	18,54	46,63	0,49
	-24,70	27,06	51,76	0,48
	-20,00	16,86	36,86	0,38
	-17,10	25,33	42,44	0,36
<i>2018 г.</i>				
Триангуляция	-18,29	14,11	32,40	0,32
	-15,60	36,07	51,67	0,30
Минимальная кривизна	-22,28	39,78	62,07	0,43
Естественный сосед	-52,48	53,08	105,57	0,48
Обратное расстояние	-17,49	14,10	31,59	0,32
	-15,82	36,33	52,16	0,29
Кригинг	-35,93	20,13	56,06	0,43
	-17,66	17,82	35,48	0,39
	-15,11	14,22	29,33	0,30
	-17,02	14,68	31,70	0,28
<i>2019 г.</i>				
Триангуляция	-24,21	17,55	41,75	0,39
	-55,95	14,69	70,63	0,34
Минимальная кривизна	-18,18	22,77	40,95	0,47
Естественный сосед	-46,88	97,69	144,58	0,55
Обратное расстояние	-22,17	17,82	39,99	0,39
	-56,27	14,90	71,17	0,34
Кригинг	-20,17	15,02	35,19	0,47
	-20,50	30,54	51,04	0,45
	-19,61	16,55	36,16	0,35
	-21,28	14,87	36,15	0,32
<i>2020 г.</i>				
Триангуляция	-16,94	20,13	37,07	0,50
	-17	12,79	29,78	0,36
Минимальная кривизна	-18,38	31,97	50,36	0,57
Естественный сосед	-62,14	133,38	195,52	0,52
Обратное расстояние	-15,41	21,05	36,46	0,49
	-16,74	13,27	30,01	0,36
Кригинг	-14,35	27,46	41,81	0,59
	-18,37	33,39	51,75	0,48
	-15,25	21,31	36,56	0,46
	-13,37	16,53	29,91	0,34

Примечание. В числителе – Расвумчоррский рудник, в знаменателе – Кукисвумчоррский рудник.

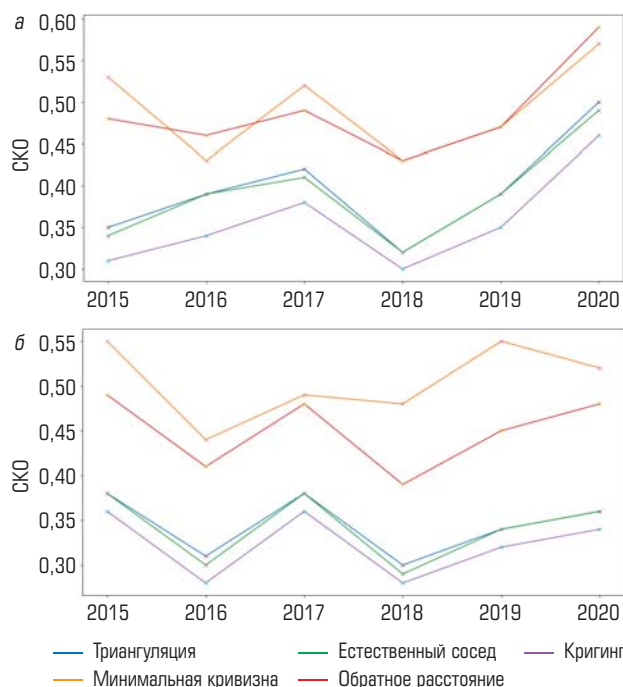


Рис. 6. Изменение СКО при построении ЦМР на Расвумчоррском (а) и Кукисвумчоррском (б) рудниках за период наблюдений

Анализ значений СКО за период наблюдений за топографической поверхностью Кукисвумчоррского рудника с 2015 по 2020 г. позволяет авторам утверждать, что наименьшее значение за рассматриваемый период получено при помощи метода «кригинг», а остальные рассматриваемые методы показали относительно равные значения СКО.

Оценка достоверности применяемого метода определения линейных параметров процессов сдвижения

Ниже (рис. 7) представлено изображение расчетной таблицы с параметрами сдвижения.

Из данных таблицы следует, что наименьшее оседание произошло в районе условного репера 4 и составило 1,1 м. Максимальное оседание наблюдается в районе репера 51 – 79,6 м.

В качестве примера на рис. 8 приведены графики расчетных параметров наклонов и кривизны.

Как видно из графиков, часть значений наклонов и кривизны находится в допустимых пределах, часть же превышает их в десятки раз. Это обусловлено большими значениями оседаний в районе условных реперов (с 70 по 90), где величины этих параметров достигают от 100 до 170 м, согласно сведениям, полученным в результате обработки данных лазерного сканирования земной поверхности.

Параллельно с определением расчетных параметров процессов сдвижения посредством введения условных

B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
	2015	2019	$\eta, м$	l	i	K		$\eta, мм$	i	K
51	148,497	228,093	79,596	20,000	-0,19752			79595,67	-197,5173878	
50	160,522	236,168	75,645	20,000	-0,19845	-4,65351E-05		75645,32	-198,4480894	-0,046535083
49	172,553	244,229	71,676	20,000	-0,20011	-8,31984E-05		71676,36	-200,1120568	-0,083198367
47	184,595	252,269	67,674	20,000	-0,20258	-0,000123208		67674,12	-202,5762249	-0,123208407
47	196,656	260,279	63,623	20,000	-0,20601	-0,000171578		63622,59	-206,0077896	-0,171578235
46	208,749	268,252	59,502	20,000	-0,21079	-0,000238899		59502,44	-210,7857706	-0,238899048
45	220,892	276,179	55,287	20,000	-0,21703	-0,000312222		55286,72	-217,0302165	-0,312222299
44	233,110	284,056	50,946	20,000	-0,22571	-0,000434223		50946,12	-225,714685	-0,434223421
43	245,439	291,871	46,432	20,000	-0,23686	-0,000557493		46431,82	-236,8645448	-0,557492991
42	257,931	299,626	41,695	20,000	-0,25133	-0,00072323		41694,53	-251,3291387	-0,723229694
41	270,657	307,325	36,668	20,000	-0,27071	-0,000968821		36667,95	-270,7055631	-0,968821223
40	283,703	314,957	31,254	20,000	-0,29177	-0,001053329		31253,84	-291,7721446	-1,053329705
39	297,166	322,584	25,418	20,000	-0,3166	-0,001241188		25418,39	-316,5959124	-1,241188386
38	311,139	330,226	19,086	20,000	-0,33866	-0,001102964		19086,48	-338,6551907	-1,102963919
37	325,685	337,999	12,313	20,000	-0,34871	-0,000502794		12313,37	-348,7110792	-0,502794423
36	340,841	346,181	5,339	20,000	-0,36484	-0,000806503		5339,151	-364,8411488	-0,806503477
35	356,693	354,735	-1,958	20,000	-0,37342	-0,000429089		-1957,67	-373,4229302	-0,429089073
34	372,854	363,428	-9,426	20,000	-0,43267	-0,002962251		-9426,13	-432,6679594	-2,962251458
33	388,507	370,427	-18,079	20,000	-0,49224	-0,002978394		-18079,5	-492,235843	-2,978394184
32	403,393	375,469	-27,924	20,000	-0,28386	0,010418708		-27924,2	-283,8616853	10,41870789
31	416,910	383,309	-33,601	20,000	0,01316	0,01485106		-33601,4	13,15951667	14,8510601
30	428,275	394,937	-33,338	20,000	0,279509	0,013317474		-33338,2	279,5090024	13,31747429
29	438,517	410,769	-27,748	20,000	0,287897	0,000419388		-27748,1	287,8967698	0,419388369
28	449,611	427,620	-21,990	20,000	0,281519	-0,000318868		-21990,1	281,519409	-0,318868042
27	460,472	444,112	-16,360	20,000	0,278867	-0,000132618		-16359,7	278,8670557	-0,132617662
26	469,175	458,393	-10,782	20,000	0,193318	-0,004277462		-10782,4	193,3178251	-4,27746153
25	476,513	469,597	-6,916	20,000	0,073419	-0,005994931		-6916,05	73,41919706	-5,994931404
24	483,465	478,017	-5,448	20,000	-0,01951	-0,004646382		-5447,66	-19,50843576	-4,646381641
23	490,448	484,610	-5,838	20,000	-0,08669	-0,003359037		-5837,83	-86,68917601	-3,359037012
22	497,608	490,036	-7,572	20,000	-0,15013	-0,003171916		-7571,62	-150,1275048	-3,171916438
21	505,203	494,629	-10,574	20,000	-0,20055	-0,00252097		-10574,2	-200,5469102	-2,520970273
20	513,306	498,721	-14,585	20,000	-0,24046	-0,001995497		-14585,1	-240,4568464	-1,995496808
19	521,542	502,147	-19,394	20,000	-0,24844	-0,000399067		-19394,2	-248,4381951	-0,399067436
18	529,058	504,695	-24,363	20,000	-0,20278	0,00228288		-24363	-202,7805887	2,282880321
17	536,049	507,630	-28,419	20,000	-0,20399	-6,03305E-05		-28418,6	-203,9871983	-0,06033048
16	543,797	511,298	-32,498	20,000	-0,14976	0,002711492		-32498,4	-149,7573608	2,711491877
15	552,689	517,195	-35,494	20,000	-0,08275	0,003350542		-35493,5	-82,7465249	3,350541793
14	563,009	525,861	-37,148	20,000	0,024627	0,005368666		-37148,4	24,62679819	5,368666155
13	575,643	538,987	-36,656	20,000	0,094517	0,003494519		-36655,9	94,51718089	3,494519135
12	589,737	554,972	-34,766	20,000	0,140298	0,002289043		-34765,6	140,2980319	2,289042552
11	605,450	573,491	-31,960	20,000	0,113311	-0,001349375		-31959,6	113,3105268	-1,349375255
10	621,758	592,064	-29,693	20,000	0,141825	0,001425705		-29693,4	141,824624	1,42570486
9	635,864	609,007	-26,857	20,000	0,248345	0,005326033		-26856,9	248,3452801	5,326032803
8	644,965	623,075	-21,890	20,000	0,322016	0,003683524		-21890	322,0157673	3,683524363
7	649,048	633,598	-15,450	20,000	0,330324	0,000415434		-15449,7	330,3244424	0,415433755
6	649,085	640,242	-8,843	20,000	0,304676	-0,001282435		-8843,19	304,6757378	-1,282435232
5	645,970	643,220	-2,750	20,000	0,192899	-0,005588839		-2749,67	192,898957	-5,588839039
4	641,609	642,717	1,108	20,000	0,096651	0,004812417		1108,308	96,65060905	4,812417398
3	637,846	640,887	3,041	20,000	-0,01215	-0,005440182		3041,32	-12,15303495	-5,4401822
2	635,265	638,063	2,798	20,000	-0,05403	-0,002093953		2798,259	-54,03210029	-2,093953267
1	633,356	635,074	1,718	20,000				1717,617		

Рис. 7. Вычисленные параметры сдвига земной поверхности по линии разреза Р16 Кукисвумчоррского месторождения
 η – оседания; l – расстояние между условными реперами; i – наклоны; K – кривизна

наблюдательных станций, на указанных рудниках проводили исследования методом численного моделирования и физического моделирования на эквивалентных материалах. Все три подхода продемонстрировали сходимость результатов, что свидетельствует о корректном применении метода расчета линейных параметров процессов сдвига через введение условных реперов.

Выводы

Таким образом, появляется возможность определения линейных параметров сдвига на участках земной поверхности, труднодоступных для выполнения наблюдений классическим способом. К сожалению, в настоящее время при использовании вышеописанного подхода точные величины погрешностей вычисляемых значений не определены.

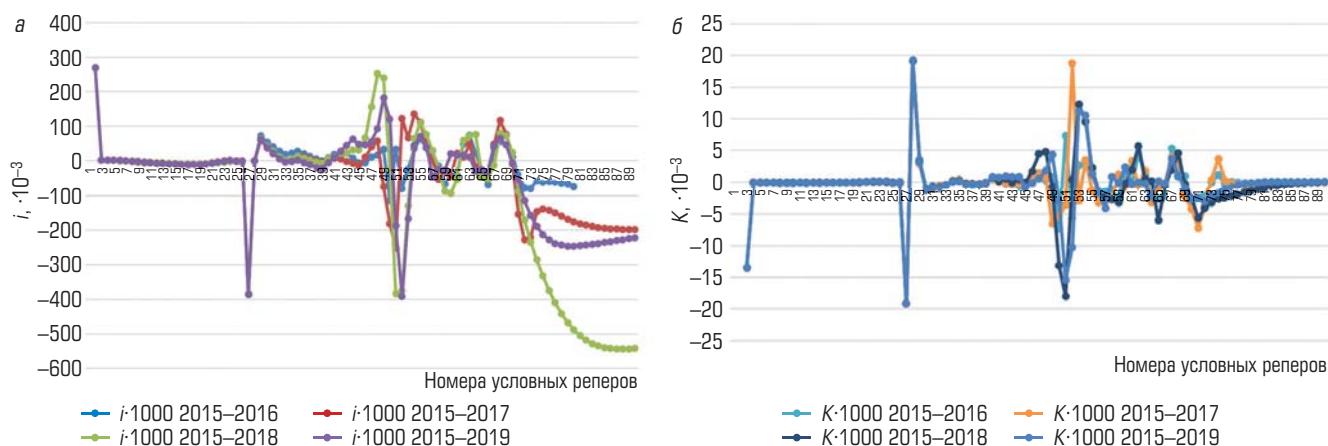


Рис. 8. График величин наклонов i (а) и кривизны K (б) условных реперов за разные интервалы времени

Решение данного вопроса является перспективным направлением исследований.

В области выбора методов пространственной интерполяции за рассматриваемый период наблюдений с 2015 по 2020 г. на Кукисвумчоррском и Расвумчоррском рудниках авторы отмечают метод «кригинг» как наиболее оптимальный среди оцениваемых. В большинстве построений размах, минимальное и максимальное значения отклонений были наименьшими при применении данного метода пространственной интерполяции, а значение СКО было минимальным во всех случаях.

Можно выделить возможность назначения метода пространственной интерполяции на нулевом цикле наблюдений, так как каждый метод, оцениваемый по СКО для построений, проявил общую тенденцию к точности относительно других для

двух объектов за весь шестилетний период, за исключением метода «минимальная кривизна» в 2016 г. на Расвумчоррском руднике, что объяснимо тем, что данный метод не является точным интерполятором, и получаемая с помощью данного метода поверхность может с различной точностью описывать участок земной поверхности.

Результаты проведенных исследований позволяют авторам надеяться, что применение вышеописанных методов даст возможность вести горные работы безопасно и с минимальными затратами времени.

Библиографический список

См. англ. блок.

«GORNYI ZHURNAL», 2023, № 5, pp. 97–103
DOI: 10.17580/gzh.2023.05.14

Determination procedure of linear parameters of movement processes from digital terrain models in Khibiny apatite–nepheline ore mining

Information about authors

E. S. Zherlygina¹, Senior Researcher, Candidate of Engineering Sciences, Zherlygina_ES@pers.spmi.ru

M. G. Mustafin¹, Head of Department, Doctor of Engineering Sciences

B. Yu. Vasiliev¹, Post-Graduate Student–Researcher

R. V. Nikolaev², Chief Surveyor

¹Research Center for Geomechanics and Mining Practice Problems, Saint-Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

²Apatit’s Division in Kirovsk, Kirovsk, Russia

Abstract

Surveying of ground and underground movements aims to determine and adjust the displacement parameters, and the type and size of deformation of undermined objects. The authors describe application of digital terrain models to assess movement process parameters as a case-study of Khibiny apatite–nepheline ore mining. The possibility to determine linear parameters of movements in the ground surface area inaccessible using classical methods is illustrated.

The source information was the aerial laser scanning data obtained in 2015 to 2020 in Rasvumchorr and Kukisvumchorr Mines. The data were classified using TerraSolid TerraScan

tools. Then, the digital terrain models were constructed in Microstation. The further digital modeling of the terrain was carried out in Golden Software’s Surfer with spatial resolution and some spatial interpolation techniques. Using the resultant digital models, the surfaces were constructed in Autodesk AutoCAD. The surfaces were used to draw cross-sections in the coordinate grid in Rhinoceros 6.

Over the observation period from 2015 to 2020, by the authors’ opinion, the method of kriging proved to be the best out of the methods tested in Rasvumchorr and Kukisvumchorr Mines. The method of spatial interpolation provided the least scatter of data, the lowest minimum and maximum deviations and the least mean square deviation in the majority of tests. The research findings allow expecting that the described methods can enable safe mining at the minimum time consumption.

Keywords: digital terrain model, movement process parameters, surveying-based monitoring, spatial interpolation methods, point cloud, aerial laser scanning.

References

- Monika, Govil M. H., Chatterjee R. S., Bhaumik P., Vishwakarma N. Deformation monitoring of Surakachhar underground coal mines of Korba, India using SAR interferometry. *Advances in Space Research*. 2022. Vol. 70, Iss. 12. pp. 3905–3916.
- Besoya M., Govil H., Bhaumik P. A review on surface deformation evaluation using multitemporal SAR interferometry techniques. *Spatial Information Research*. 2021. Vol. 29, Iss. 3. pp. 267–280.
- El Kamali M., Saibi H., Abuelgasim A. Land surface deformation monitoring in the Al-Ain arid region (UAE) using microgravity and SAR interferometry surveys. *Environmental Research*. 2022. Vol. 212. 113505. DOI: 10.1016/j.envres.2022.113505
- Varbla S., Ellmann A., Puust R. Centimeter-range deformations of built environment

- revealed by drone-based photogrammetry. *Automation in Construction*. 2021. Vol. 128. 103787. DOI: 10.1016/j.autcon.2021.103787
5. Devyatkov S. Yu. Estimation of earth surface deformations during pillar mining. *Procedia Structural Integrity*. 2021. Vol. 32. pp. 56–63.
 6. Lu He, Di Wu, Linfeng Ma. Numerical simulation and verification of goaf morphology evolution and surface subsidence in a mine. *Engineering Failure Analysis*. 2022. Vol. 144. 106918. DOI: 10.1016/j.engfailana.2022.106918
 7. Shuyin Jiang, Gangwei Fan, Qizhen Li, Shizhong Zhang, Liang Chen. Effect of mining parameters on surface deformation and coal pillar stability under customized shortwall mining of deep extra-thick coal seams. *Energy Reports*. 2021. Vol. 7. pp. 2138–2154.
 8. Kozyrev A. A., Demidov Yu. V., Maltsev V. A., Enyutin A. N., Aminov V. N. et al. Instructions on overlying rock caving control and protection of structures and nature from underground mining impact at Apatit JSC. Apatity, 2002. 51 p.
 9. Ponomarenko M. R., Kutepov Yu. I., Shabarov A. N. Open pit mining monitoring support with information and analysis using web mapping technologies. *GIAB*. 2022. No. 8. pp. 56–70.
 10. Karasev M. A., Protosenya A. G., Katerov A. M., Petrushin V. V. Analysis of shaft lining stress state in anhydrite–rock salt transition zone. *Rudarsko-geološko-naftni zbornik*. 2022. Vol. 37, No. 1. pp. 151–162.
 11. Bykova E., Skachkova M., Raguzin I., Dyachkova I., Boltov M. Automation of Negative Infrastructural Externalities Assessment Methods to Determine the Cost of Land Resources Based on the Development of a “Thin Client” Model. *Sustainability*. 2022. Vol. 14, Iss. 15. 9383. DOI: 10.3390/su14159383
 12. Protosenya A. G., Katerov A. M. Development of stress and strain state of combined support for a vertical shaft driven in salt massif. *GIAB*. 2022. No. 6-1. pp. 100–113.
 13. Janczewicz K., Poręba W. Point cloud does matter. Selected issues of using airborne LiDAR elevation data in geomorphometric studies of rugged sandstone terrain under forest—Case study from Central Europe. *Geomorphology*. 2022. Vol. 412. 108316. DOI: 10.1016/j.geomorph.2022.108316
 14. Chuanfa Chen, Yixuan Bei, Yanyan Li, Weiwei Zhou. Effect of interpolation methods on quantifying terrain surface roughness under different data densities. *Geomorphology*. 2022. Vol. 417. 108448. DOI: 10.1016/j.geomorph.2022.108448
 15. Menshikov S. N., Dzhalyabov A. A., Vasilev G. G., Leonovich I. A., Ermilov O. M. Spatial Models Developed Using Laser Scanning at Gas Condensate Fields in the Northern Construction-Climatic Zone. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 238. pp. 430–437.
 16. Gusev V. N., Blishchenko A. A., Sannikova A. P. Study of a set of factors influencing the error of surveying mine facilities using a geodesic quadcopter. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 254. pp. 173–179.
 17. Altaeva A. A., Shamganova L. S., Zhironov A. A. Digital simulation of the Orlov deposit surface using geoinformation technologies. *Gornyi Zhurnal*. 2019. No. 4. pp. 77–80. DOI: 10.17580/gzh.2019.04.17
 18. Kremcheev E. A., Danilov A. S., Smirnov Yu. D. Metrological support of monitoring systems based on unmanned aerial vehicles. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 235. pp. 96–105.
 19. Liuru Hu, Navarro-Hernández M. I., Xiaojie Liu, Tomás R., Xinming Tang, et al. Analysis of regional large-gradient land subsidence in the Alto Guadalentin Basin (Spain) using open-access aerial LiDAR datasets. *Remote Sensing of Environment*. 2022. Vol. 280. 113218. DOI: 10.1016/j.rse.2022.113218
 20. Sennov A. S., Mukhametdinov A. V., Myasichenko A. I., Kalugin A. V. Application of information technologies in the analyses of groundwater in the Upper Kama Potash–Magnesium Salt Deposits. *Gornyi Zhurnal*. 2021. No. 4. pp. 63–68. DOI: 10.17580/gzh.2021.04.09
 21. Zemenkova M. Yu., Chizhevskaya E. L., Zemenkov Yu. D. Intelligent monitoring of the condition of hydrocarbon pipeline transport facilities using neural network technologies. *Journal of Mining Institute*. 2022. Vol. 258. pp. 933–944.
 22. Jin H., Mountrakis G. Fusion of optical, radar and waveform LiDAR observations for land cover classification. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 2022. Vol. 187. pp. 171–190.
 23. Pisarenko M. V. The anticipated movement and perforations of the earth surface forecast the use of the GIS technologies. *GIAB*. 2009. Special issue 17. Kuzbass-2. pp. 310–315.
 24. Verbilov P. E., Iovlev G. A., Petrov N. E., Pavlenko G. D. Application of information modeling technologies for surveying support of mining operations. *GIAB*. 2022. No. 6-2. pp. 60–79.
 25. Petrova T. A., Astapenka T. S., Kologrivko A.A., Esman N. M. Reducing the geo-environmental impact of halite waste storage. *GIAB*. 2022. No. 10-1. pp. 155–162.
 26. Kutepova N. A., Moseykin V. V., Kondakova V. N., Pospheov G. B., Straupnik I. A. Specificity of properties of coal processing waste regarding their storage. *GIAB*. 2022. No. 12. pp. 77–93.
 27. Jaballah M., Camenen B., Paquier A., Jodeau M. An optimized use of limited ground based topographic data for river applications. *International Journal of Sediment Research*. 2019. Vol. 34, Iss. 3. pp. 216–225.
 28. Huxiong Li, Weiya Ye, Jun Liu, Weikai Tan, Saied Pirasteh et al. High-Resolution Terrain Modeling Using Airborne LiDAR Data with Transfer Learning. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13, Iss. 17. 3448. DOI: 10.3390/rs13173448
 29. Das R. K., Samanta S., Jana S. K., Rosa R. Polynomial interpolation methods in development of local geoid model. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 2018. Vol. 21, Iss. 3. pp. 265–271.
 30. Ahmed H. M., Mohamed E. A., Bahaa S. A. Evaluating two numerical methods for developing a local geoid model and a local digital elevation model for the Red Sea Coast, Egypt. *Journal of King Saud University—Engineering Sciences*. 2021. DOI: 10.1016/j.jksues.2021.04.004
 31. Banasik P., Bujakowski K. The use of quasigeoid in leveling through terrain obstacles. *Reports on Geodesy and Geoinformatics*. 2017. Vol. 104. pp. 57–64.
 32. Borowski Ł., Banaś M. The Best Robust Estimation Method to Determine Local Surface. *Baltic Journal of Modern Computing*. 2019. Vol. 7, No. 4. pp. 525–540.
 33. Amodio A. M., Aucelli P. P. C., Garfi V., Roskopf C. M. Digital photogrammetric analysis approaches for the realization of detailed terrain models. *Rendiconti Online della Società Geologica Italiana*. 2020. Vol. 52. pp. 69–75.
 34. Maan Habib, Yazan Alzubi, Ahmad Malkawi, Mohammad Awwad. Impact of interpolation techniques on the accuracy of large-scale digital elevation model. *Open Geosciences*. 2020. Vol. 12. pp. 190–202.
 35. Boreggio M., Bernard M., Gregoretti C. Evaluating the Differences of Gridding Techniques for Digital Elevation Models Generation and Their Influence on the Modeling of Stony Debris Flows Routing: A Case Study from Rovina di Cancia Basin (North-Eastern Italian Alps). *Frontiers in Earth Science*. 2018. Vol. 6. 89. DOI: 10.3389/feart.2018.00089
 36. Agüera-Vega F., Agüera-Puntas M., Martínez-Carricondo P., Mancini F., Carvajal F. Effects of point cloud density, interpolation method and grid size on derived Digital Terrain Model accuracy at micro topography level. *International Journal of Remote Sensing*. 2020. Vol. 41, Iss. 21. pp. 8281–8299.
 37. Căteanu M., Ciubotaru A. Accuracy of Ground Surface Interpolation from Airborne Laser Scanning (ALS) Data in Dense Forest Cover. *ISPRS International Journal of Geo-Information*. 2020. Vol. 9, Iss. 4. 224. DOI: 10.3390/ijgi9040224
 38. Szabó Z., Tóth C. A., Holb I., Szabó S. Aerial Laser Scanning Data as a Source of Terrain Modeling in a Fluvial Environment: Biasing Factors of Terrain Height Accuracy. *Sensors*. 2020. Vol. 20, Iss. 7. 2063. DOI: 10.3390/s20072063
 39. Wojciech M. Kriging Method Optimization for the Process of DTM Creation Based on Huge Data Sets Obtained from MBESs. *Geosciences*. 2018. Vol. 8, No. 12. 433. DOI: 10.3390/geosciences8120433
 40. Chuanfa Chen, Yuan Gao, Yanyan Li, Yixuan Bei. Structure tensor-based interpolation for the derivation of accurate digital elevation models. *Catena*. 2022. Vol. 208. 105733. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105733
 41. Arun P. V. A comparative analysis of different DEM interpolation methods. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*. 2013. Vol. 16, Iss. 2. pp. 133–139.
 42. Stereńczak K., Ciesielski M., Bałazy R., Zawila-Niedzwiecki T. Comparison of various algorithms for DTM interpolation from LiDAR data in dense mountain forests. *European Journal of Remote Sensing*. 2016. Vol. 49. pp. 599–621.
 43. Ibrahim P. O., Sternberg H., Samaila-Ija H. A., Adgidzi D., Nwadior I. J. Modeling topobathymetric surface using a triangulation irregular network (TIN) of Tunga Dam in Nigeria. *Applied Geomatics*. 2023. Vol. 15. pp. 281–293.
 44. Jordan G. Adaptive smoothing of valleys in DEMs using TIN interpolation from ridge line elevations: An application to morphotectonic aspect analysis. *Computers & Geosciences*. 2007. Vol. 33, Iss. 4. pp. 573–585.
 45. Maduako Nnamdi Ikechukwu, Elijah Ebinne, Ufot Idorenyin, Ndukwu Ike Raphael. Accuracy Assessment and Comparative Analysis of IDW, Spline and Kriging in Spatial Interpolation of Landform (Topography): An Experimental Study. *Journal of Geographic Information System*. 2017. Vol. 9, No. 3. pp. 354–371.
 46. Valkov V. A., Vinogradov K. P., Valkova E. O., Mustafin M. G. Creating highly informative rasters based on laser scanning and aerial photography data. *Geodeziya i kartografiya*. 2022. No. 11. pp. 40–49.
 47. Instruction on observations of rock and earth surface movement during the underground mining of ore deposits. Moscow : Nedra, 1988. 112 p.