

УДК 556.388

ЭКОЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В РАЙОНЕ ГРЯЗЕВОГО ВУЛКАНА В СИДОАРДЖО (ПРОВИНЦИЯ ВОСТОЧНАЯ ЯВА, ИНДОНЕЗИЯ)

Адьякса Илхам Путра¹,
ilhamadiyaksa@gmail.com

Савичев Олег Геннадьевич¹,
OSavichev@mail.ru

Хващевская Альбина Анатольевна¹,
Garibova@yandex.ru

¹ Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.

Актуальность. В восточной части острова Ява (Индонезия), в провинции Восточная Ява, округе Сидоарджо, с 2006 г. функционирует крупнейший в мире грязевой вулкан. Прилегающие территории густо заселены, что определяет постоянную потребность в качественной питьевой воде. Дефицит качественной воды усугубляется влиянием грязевого вулкана.

Цель: оценка эколого-геохимического состояния грунтовых вод на территории, прилегающей к крупнейшему в мире грязевому вулкану в Сидоарджо (Индонезия, провинция Восточная Ява).

Методы: методы определения химического состава грунтовых вод, статистические методы, методы математического моделирования.

Результаты и выводы. Получена предварительная оценка эколого-геохимического состояния грунтовых вод в районе грязевого вулкана в Сидоарджо по результатам обследования в январе, феврале и октябре 2022 г. Показано, что грунтовые воды оцениваются как: 1) пресные с повышенной минерализацией, гидрокарбонатные кальциевые на участках вне основного направления уклона земной поверхности и движения водных масс с запада-юго-запада на восток-северо-восток, ограниченно пригодные для хозяйственно-питьевого использования (использование при условии водоподготовки); 2) соленоватые, хлоридные натриевые, с высокими содержаниями Hg, I, Br, B, не пригодные для хозяйственно-питьевого использования. Повышенные концентрации Na⁺, Cl⁻, I, Br, B, предположительно, свидетельствуют об участии в формировании состава флюидов грязевого вулкана морских вод. Генезис Hg требует более детального изучения и, возможно, связан с локальными особенностями. В целом наиболее объективным показателем влияния на состояние именно грязевого вулкана является содержание Cl⁻. Даны рекомендации по проведению дальнейших гидрогеохимических исследований в Сидоарджо.

Ключевые слова:

грязевой вулкан в Сидоарджо, Индонезия, грунтовые воды, химический состав, качество.

Введение

Ява – один из Больших Зондских островов Малайского архипелага, расположен в пределах субдукционной границы Индо-Австралийской и Евразийской плит и считается одним из самых активных участков современного вулканизма [1]. Восточная часть Явы, административно соответствующая провинции Восточная Ява республики Индонезия, характеризуется наличием ряда грязевых вулканов. В том числе, в округе Сидоарджо (Sidoarjo) расположен крупнейший в мире грязевой вулкан Луסי (Lusi – сокращение сочетания характеристики Lumpuk – «грязь» и географической привязки Sidoarjo – округ Сидоарджо), приуроченный к разлому Уотукосек (Watukosek). Извержение этого вулкана началось 29.05.2006 г., а в качестве причин рассматриваются [2–5]:

1) антропогенное воздействие на горно-геологические условия при бурении геологоразведочной скважины на газ; работы выполняла компания PT Lapindo Brantas; на глубинах 500–1300 м были вскрыты глинистые отложения, ниже – пески, сланцы, вулканические отложения, еще ниже – карбонатные породы; скважина была обсажена до 1091 м, в 5 часов по местному времени 29.05.2006 г. при достижении глубины 2834 м

грязь (смесь глины, солёной воды и небольшого количества газа, состав которого близок к составу газа из более глубоких горизонтов рядом расположенного месторождения Вунут (Wunut)) при температуре до 100 °С вырвалась примерно в 200 м к юго-западу от скважины; первоначально объем грязи достигал 180000 м³/сут со снижением до 7000–20000 м³/сут, а её состав указывает на участие отложений в диапазоне глубин примерно от 1200–1300 до 1870 м (данные о бурении и параметрах грязевого потока в разных источниках могут различаться); в целом по результатам рентгенофазового анализа изверженное вещество по химическому составу на 44,1 % представлено SiO₂, на 23,7 % – Fe₂O₃ [6];

- 2) активизация разлома в результате землетрясения магнитудой 6,3, которое произошло 27.05.2006 г. примерно в 250 км к юго-западу от Сидоарджо;
- 3) естественные геотермальные процессы (ближайший вулкан Арджуно-Велиранг (Arjuno-Welirang) находится менее чем в 15 км от рассматриваемой территории).

Функционирование грязевого вулкана привело к разрушению и занесению грязевыми потоками жилых объектов на площади около 7,5 км². Зона его влияния

охватывает 16 деревень в трех подрайонах, а именно Поронг (Porong), Тангулангин (Tanggulangin) и Джабон (Jabon). Из-за поступления грязевых потоков в реку Поронг и другие водотоки отмечены аккумуляция наносов и снижение качества речной воды, повлекшее морфологические изменения гидробионтов [7–9]. Впоследствии нарушенные земли были обнесены дамбой. Но из-за наводнений и периодической активизации грязевого вулкана для прилегающих селитебных территорий сохраняется угроза непосредственного разрушения жилых и производственных объектов на прилегающей территории, а также загрязнение подземных (грунтовых) вод в районе грязевого вулкана [10]. Последнее обстоятельство с учётом существующих водных проблем самого густонаселенного острова Индонезии (большая часть воды используется для орошения, а в засушливый период наблюдается её дефицит, в результате отбора подземных вод происходит оседание земной поверхности и интрузия морских вод [11]) и определило актуальность и цель рассматриваемого исследования – оценка эколого-геохимического состояния грунтовых вод в округе Сидоарджо (Индонезия, провинция Восточная Ява) в районе грязевого вулкана Луси в 2022 г.

Методика исследования

Отбор проб грунтовых вод выполнен Илхамом Путра Адыякса с учетом рекомендаций [12, 13] из колодцев глубиной 6–10 м из приповерхностного слоя: 5 проб (A1–A5) – в поселении Кеденсари в районе Тангулангин округа Сидоарджо (Kedensari village, Tanggulangin, Sidoarjo) в период дождей (в среднем с ноября по март), в конце января – начале февраля 2022 г.; 5 проб (B1–B5) – в подрайоне Поронг округа Сидоарджо (Porong, Sidoarjo) в конце засушливого периода, 2 октября 2022 г. (рис. 1). Все колодцы вскрывают аллювиальные отложения, представленные глинами, песками и гравием, используются для питьевого водоснабжения (A1–A5) или использовались ранее (B1–B5).

В пробах A1–A5 в лаборатории окружающей среды Джаса Тирта 1 в г. Маланг, Индонезия, Восточная Ява (the Environmental Laboratory, Jasa Tirta I, Malang), определены мутность (нефелометрия), содержания Cl^- (аргентометрия), Na^+ (атомно-абсорбционная спектрометрия с пламенной атомизацией) и SO_4^{2-} (турбидиметрический метод), в полевых условиях измерены температура воды и pH (потенциометрический метод) [10].

Анализ проб воды B1–B5 выполнен в гидрогеохимической лаборатории Томского политехнического университета (ТПУ), где было проведено определение значений pH (потенциометрический метод), удельной электропроводности EC (кондуктометрический), перманганатной окисляемости (ПО), содержаний Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^- , CO_2 (титриметрический), SO_4^{2-} (турбидиметрический), NH_4^+ , NO_2^- , NO_3^- , фосфатов, Fe (фотоколориметрический), Na^+ , K^+ (пламенно-эмиссионно спектрометрический), более 30 микроэлементов (масс-спектрометрический с индуктивно-связанной плазмой с использованием масс-

спектрометра NexION 300D), углерод органический, неорганический, общий и азот общий (высокотемпературное каталитическое окисление).

Анализ результатов рассматриваемого исследования включал расчёт:

- 1) коэффициентов корреляции r и погрешностей их определения δ_r по формуле (1), выявление регрессионных зависимостей при уровне значимости 5 % и условии (2):

$$\delta_r = \frac{1-r^2}{\sqrt{N-1}} \cdot \sqrt{1 + \frac{11 \cdot r^2}{2 \cdot N} + \frac{75 \cdot r^2 - 13}{2 \cdot N^2}}, \quad (1)$$

$$R^2 > 0,36; \frac{|r|}{\delta_r} \geq 2; \frac{|k_r|}{\delta_k} \geq 2, \quad (2)$$

где N – объем выборки; R^2 – квадрат корреляционного отношения; k_r и δ_k – коэффициент регрессии и погрешность его определения [14, 15]; расчёты выполнены в среде MS Excel;

- 2) показателя аддитивного воздействия K_f (3) токсичных веществ 1, 2 классов опасности согласно требованиям, предъявляемым к качеству вод хозяйственно-питьевого назначения в Российской Федерации [16], и суммарного показателя отклонения химического состава исследуемых грунтовых вод K_c (4) по сравнению со средними значениями для подземных вод зоны гипергенеза $C_{a(gsz)}$, грунтовых вод тропических лесов $C_{a(gtf)}$ и сухих саванн $C_{a(gds)}$ согласно [17]:

$$K_f = \sum_{i=1-2} \frac{C_i}{C_{dni}}, \quad (3)$$

$$K_c(j) = \sum_{C_i \geq 2 \cdot C_{a(i,j)}} \frac{C_i}{C_{a(i,j)}} - (N_* - 1), \quad (4)$$

где C_i – концентрация i -го вещества; C_{dni} – предельно-допустимая концентрация i -го вещества 1 или 2 классов опасности согласно [16]; $C_{a(i,j)}$ – среднее содержание i -го вещества в j -м водном объекте (подземных водах мира в пределах зоны гипергенеза, в грунтовых водах тропических лесов и сухих саванн) согласно [18]; N_* – количество случаев, когда $C_i \geq 2 \cdot C_{a(i,j)}$;

- 3) индексов насыщения SI грунтовых вод относительно ряда минералов (5) методом констант по методике, изложенной в [19]:

$$SI = \lg PA - \lg K_{neq}, \quad (5)$$

где K_{neq} – константа неустойчивости; PA – произведение активностей взаимодействующих веществ; кроме ряда минералов.

Результаты исследования и их обсуждение

Грунтовые воды в округе Сидоарджо по минерализации (согласно [20–22]) характеризуются в основном как пресные с повышенной минерализацией (табл. 1, 2). К солоноватым относятся только воды в пункте B5, расположенном по направлению грязевого потока (рис. 1, б). По химическому составу грунтовые воды в пунктах B1, B2, B3 гидрокарбонатные кальциевые, первого и второго типов по О.А. Алекину [20], в пунктах B4 и B5 – хлоридные натриевые (табл. 2), причем в пункте B5 – третьего типа, что обычно соответствует условиям формирования химического со-

става морских вод [21]. По величине рН (согласно [23]) воды в четырёх случаях из десяти слабощелочные (7,5–8,5), еще в четырёх – нейтральные (6,5–7,5), в двух – слабокислые (5,0–6,5).

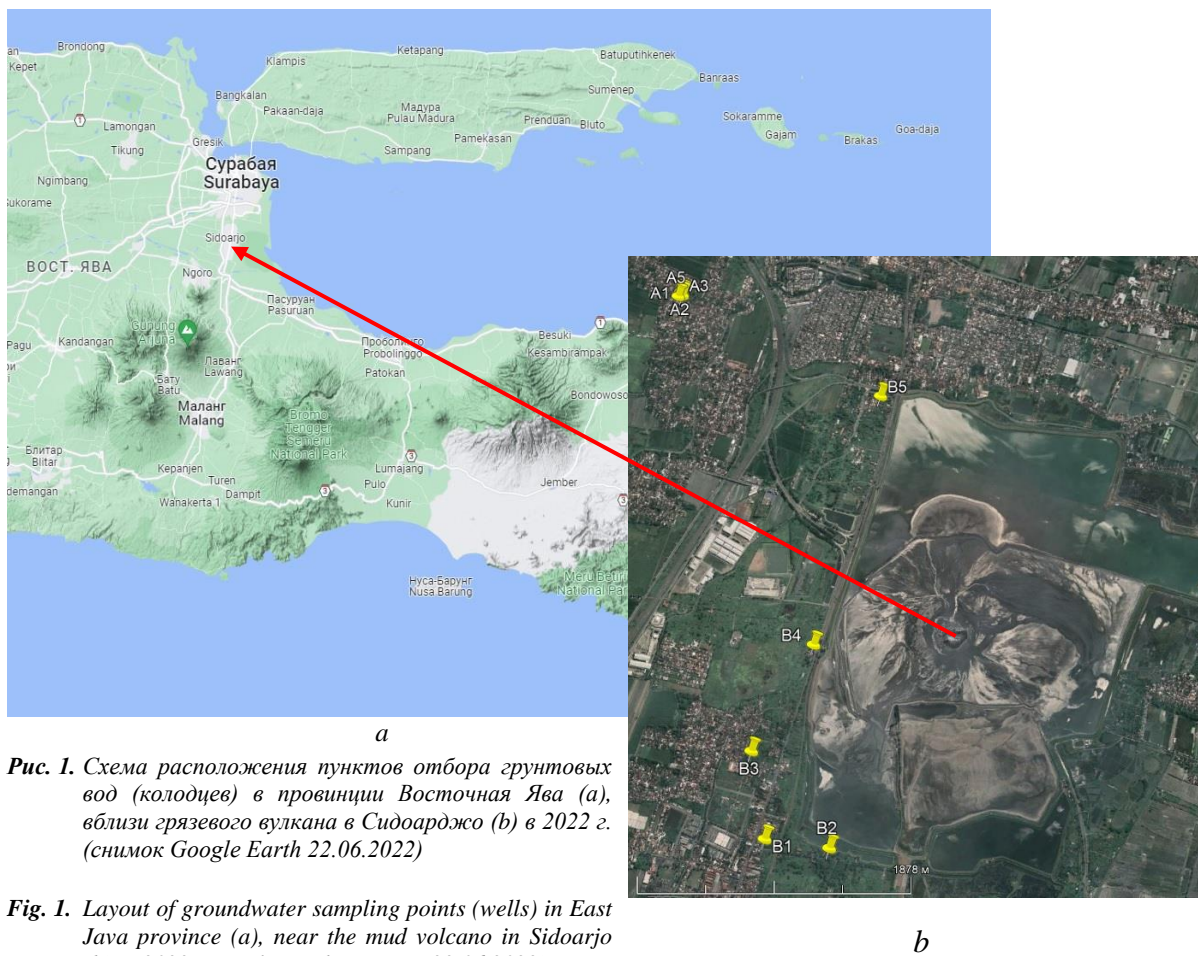


Рис. 1. Схема расположения пунктов отбора грунтовых вод (колодцев) в провинции Восточная Ява (а), вблизи грязевого вулкана в Сидоарджо (б) в 2022 г. (снимок Google Earth 22.06.2022)

Fig. 1. Layout of groundwater sampling points (wells) in East Java province (a), near the mud volcano in Sidoarjo (b) in 2022 (Google Earth image at 22.06.2022)

Таблица 1. Физико-химические и химические показатели грунтовых вод в поселении Кеденсари в районе Тангулангин округа Сидоарджо в конце января – начале февраля 2022 г. [10]

Table 1. Physicochemical and chemical indicators of groundwater in the Kedensari village, Tanggulangin, Sidoarjo from late January to early February 2022 [10]

Показатель Indicator	Ед. изм. Units	Пункты отбора проб (рис. 1) Sampling points (Fig. 1)				
		A1	A2	A3	A4	A5
Дата отбора/Date of sampling	–	11.01.22			01.02.22	
Широта/Latitude, φ	° (южной широты)/south	–7,505				
Долгота/Longitude, λ	°	112,693	112,693	112,693	112,693	112,692
Температура воздуха/Air temperature, T_a	°C	28,0	28,8	28,6	30,0	29,0
Температура воды/Water temperature, T_w	°C	26,7	28,5	28,3	29,2	28,7
Мутность/Turbidity, SS	NTU	1,0	1,1	0,9	0,8	1,5
рН	–	7,76	7,53	6,69	8,20	7,82
Сумма главных ионов/Sum of main ions, Σ_{mi} *	мг/дм ³ /mg/dm ³	561	551	553	560	533
Na ⁺	То же/The same	1,7	1,4	1,6	29,7	17,4
Cl ⁻	–/–	62,9	56,1	57,5	62,5	42,3
SO ₄ ²⁻	–/–	32,6	26,3	25,2	26,6	17,0

Примечание: *значения суммы главных ионов (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^-) вычислены по зависимости, полученной для проб B1–B5: $\Sigma_{mi} = (476,23 \pm 28,69) + (1,34 \pm 0,04) \cdot [Cl^-]$; $R^2 = 0,99$.

Note: *the values of the sum of the main ions (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , HCO_3^- , CO_3^{2-} , SO_4^{2-} , Cl^-) are calculated from the dependence obtained for samples B1–B5: $\Sigma_{mi} = (476,23 \pm 28,69) + (1,34 \pm 0,04) \cdot [Cl^-]$; $R^2 = 0,99$.

В пространственном отношении максимальные концентрации макрокомпонентов отмечены вблизи нарушенных грязевыми потоками земель, в их север-

ной-северо-западной части; наиболее высокие содержания органических веществ и очень высокие концентрации NO_2^- – к юго-западу от грязевого вулкана.

Корреляционный анализ проводился для значений рН, содержания Na^+ , Cl^- и позволил выявить значимые связи между первыми двумя показателями и расстоянием L от центра Луси (коэффициенты корреляции: $r[L; \text{pH}] = 0,81 \pm 0,14$; $r[L; \text{Na}^+] = 0,56 \pm 0,25$). Статистиче-

ски значимая регрессионная зависимость выявлена только для рН:

$$\text{pH} = (5,56 \pm 0,10) + (0,62 \pm 0,16) \cdot L;$$

$$R^2 = 0,66; L \text{ в км.}$$

Таблица 2. Химический состав грунтовых вод в округе Сидоарджо по состоянию на 2 октября 2022 г.

Table 2. Chemical composition of groundwater in Sidoarjo, 2 October 2022

Показатель Indicator	Ед. изм. Units	Пункты отбора проб (рис. 1) Sampling points (Fig. 1)					$C_{a(oc)}$	Подземные воды Groundwaters [18]			C_{dn} [16]
		B1	B2	B3	B4	B5		$C_{a(gsz)}$	$C_{a(gtf)}$	$C_{a(gds)}$	
φ	°	-7,540	-7,541	-7,535	-7,528	-7,512	–	–	–	–	–
λ	°	112,700	112,704	112,699	112,703	112,706	–	–	–	–	–
T_a	°C	29,3	28,9	30,2	30,7	30,6	–	–	–	–	–
T_w	°C	28,0	27,6	28,5	29,2	29,3	–	–	–	–	–
EC	мкС/см μS/cm	591	584	455	1229	3160	–	–	–	–	–
pH	–	6,52	6,63	6,59	6,47	6,39	8,20 ^a	6,90	6,00	7,20	6–9
CO_2	мг/дм ³ mg/dm ³	12,5	8,8	7,0	8,8	12,3	–	26,6	97,0	–	–
PO	То же The same	3,8	5,6	0,9	3,0	5,0	–	–	–	–	5(c)/7(nc)
C_{sum}	–/–	86,4	72,7	65,2	85,1	46,6	–	–	–	–	–
C_{org}	–/–	13,4	11,7	2,1	13,1	3,9	0,5 ^b	8,3	10,9	4,1	–
C_{noorg}	–/–	73,0	61,0	63,1	72,0	42,7	–	–	–	–	–
Σ_{mi}	–/–	576,2	535,3	441,1	863,0	2579,0	34785,7 ^a	447,6	148,6	286,3	1000(c) 1500(nc)
Классификация воды Water classification [20]	–	$C_{Ca I}$	$C_{Ca II}$	$C_{Ca I}$	$Cl_{Na I}$	$Cl_{Na III}$	$Cl_{Na III}$	$C_{Na II}$	$C_{Ca I}$	$C_{Mg I}$	–
Ca^{2+}	–/–	68,0	68,0	57,6	70,4	238,0	408,3 ^a	39,2	16,1	28,1	–
Mg^{2+}	–/–	21,0	17,3	22,0	22,4	73,0	1283,5 ^a	18,2	8,2	19,1	50
Na^+	–/–	50,0	61,0	32,0	192,0	412,0	10674,1 ^a	67,6	8,9	17,8	200
K^+	–/–	27,0	7,2	8,2	8,2	29,0	395,8 ^a	5,2	2,7	1,7	–
HCO_3^-	–/–	356	290	288	344	220	141 ^a	187	103	194	–
SO_4^{2-}	–/–	29,0	26,0	14,0	18,0	35,0	2689,9 ^a	70,7	3,7	15,0	500
Cl^-	–/–	25,2	65,8	19,3	208,0	1572,0	19192,9 ^a	59,7	6,0	10,6	350
P	–/–	2,03	0,57	0,92	1,39	0,78	0,088 ^b	0,06	–	–	1,37*
NO_3^-	–/–	3,40	4,00	0,88	8,90	8,70	–	2,40	1,30	1,60	45,00
NO_2^-	–/–	7,70	5,30	0,36	1,73	0,70	–	0,19	–	0,09	3,00
NH_4^+	–/–	0,14	0,29	0,18	0,64	0,09	–	0,59	0,13	0,07	1,50
N_{sum}	–/–	3,32	2,57	<0,50	2,88	2,47	–	–	–	–	–
Si	–/–	13,67	9,60	13,82	13,44	8,24	2,90 ^b	8,37	8,23	14,77	20
Li	мкг/дм ³ μg/dm ³	0,28	1,61	0,31	0,48	0,94	170 ^b	13,00	–	2,70	30
B	То же The same	93	158	68	119	1776	4440 ^a	78	–	–	500
Al	–/–	0,93	11,21	3,47	2,18	40,68	1,00 ^b	226,00	369,00	32,20	200
Sc	–/–	1,91	1,31	1,61	2,03	1,20	0,04 ^c	0,07	–	–	–
Ti	–/–	2,29	1,88	1,37	1,92	4,26	1,00 ^b	17,40	3,60	3,20	–
V	–/–	1,01	1,12	7,09	1,63	23,91	1,90 ^b	1,34	–	0,50	100
Mn	–/–	1476	714	291	4112	619	2 ^c	55	33	53	100
Fe	–/–	74	417	87	1482	200	10 ^c	481	396	362	300
Cr	–/–	2,04	1,82	1,99	2,47	1,61	0,20 ^b	2,70	–	3,80	–
Co	–/–	0,14	0,17	0,07	0,15	0,26	0,39 ^b	0,39	1,90	1,00	100
Ni	–/–	0,87	0,58	<0,03	0,10	2,01	6,60 ^b	3,38	4,00	7,60	20
Cu	–/–	0,13	1,17	0,53	2,04	2,79	0,90 ^b	5,38	3,40	4,50	1000
Zn	–/–	7,99	64,67	0,87	1,54	7,54	5,00 ^b	38,40	36,50	–	5000
Ga	–/–	0,04	0,03	0,01	0,14	0,03	–	–	–	–	–
Ge	–/–	0,32	0,03	<0,01	0,10	0,01	–	–	–	–	–
As	–/–	0,17	0,59	6,36	16,23	3,11	2,60 ^b	1,46	–	–	10
Se	–/–	0,17	0,86	0,52	2,24	14,31	0,09 ^b	0,72	–	0,13	10
Br	–/–	50	151	55	757	3922	67300 ^a	103	–	–	200
Rb	–/–	21	12	8	11	21	120 ^b	2	–	2	–
Sr	–/–	482	405	309	554	1263	8100 ^b	183	27	30	7000
Y	–/–	0,004	0,030	0,008	0,073	0,062	–	–	–	–	–
Zr	–/–	0,005	0,041	0,002	0,035	0,039	0,026 ^b	1,200	–	–	–
Nb	–/–	<0,003	0,009	0,001	0,010	<0,003	0,015 ^b	0,450	–	–	10,00

Показатель Indicator	Ед. изм. Units	Пункты отбора проб (рис. 1) Sampling points (Fig. 1)					$C_{a(oc)}$	Подземные воды Groundwaters [18]			C_{dn} [16]
		B1	B2	B3	B4	B5		$C_{a(gsz)}$	$C_{a(gff)}$	$C_{a(gds)}$	
Mo	–/–	3,16	0,87	3,20	2,99	3,85	10,00 ^b	1,75	–	1,40	70,00
Ru	–/–	0,018	<0,003	<0,003	<0,003	<0,003	–	–	–	–	–
Rh	–/–	0,006	0,006	0,007	0,014	0,023	–	–	–	–	–
Pd	–/–	0,007	0,010	0,003	0,008	0,021	–	–	–	–	–
Ag	–/–	0,009	<0,003	<0,003	<0,003	0,004	0,280 ^b	0,260	–	–	50,0
Cd	–/–	<0,001	<0,001	<0,001	<0,001	0,071	0,110 ^b	0,240	–	–	1,00
Sn	–/–	<0,003	0,016	<0,003	0,076	0,261	0,810 ^b	0,390	–	–	2000,00
Sb	–/–	1,209	0,125	0,123	0,004	0,485	0,330 ^b	0,680	–	–	5,00
I	–/–	25	69	66	96	3143	64 ^b	8	–	–	125,00
Cs	–/–	0,026	0,092	<0,001	0,044	0,023	0,300 ^b	0,260	–	–	–
Ba	–/–	183	101	43	185	238	21 ^b	18	13	9	700
La	–/–	0,002	0,023	0,005	0,006	0,055	0,003 ^b	0,670	–	–	–
Ce	–/–	<0,001	0,036	0,007	0,010	0,093	–	–	–	–	–
Pr	–/–	<0,001	0,003	<0,001	<0,001	0,012	–	–	–	–	–
Nd	–/–	<0,001	0,013	<0,001	<0,001	0,024	–	–	–	–	–
Sm	–/–	<0,001	0,017	<0,001	<0,001	0,029	–	–	–	–	–
Eu	–/–	0,022	0,020	0,006	0,031	0,037	–	–	–	–	–
Tb	–/–	<0,001	0,002	<0,001	0,001	<0,001	–	–	–	–	–
Dy	–/–	<0,001	0,005	<0,001	0,004	0,012	–	–	–	–	–
Ho	–/–	<0,001	0,002	<0,001	0,003	0,001	–	–	–	–	–
Er	–/–	<0,001	0,002	<0,001	0,002	0,007	–	–	–	–	–
Tm	–/–	<0,001	0,001	0,001	<0,001	0,001	–	–	–	–	–
Yb	–/–	0,003	<0,001	<0,001	0,003	0,004	–	–	–	–	–
Lu	–/–	0,001	<0,001	<0,001	0,001	0,001	–	–	–	–	–
Hf	–/–	0,003	0,011	0,003	0,008	<0,001	–	–	–	–	–
W	–/–	0,22	0,05	0,03	0,11	<0,01	–	–	–	–	50
Re	–/–	<0,001	0,002	0,002	<0,001	<0,001	–	–	–	–	–
Ir	–/–	<0,003	0,002	<0,003	0,003	<0,003	–	–	–	–	–
Au	–/–	<0,003	<0,003	<0,003	0,024	0,042	0,011 ^b	0,005	0,001	–	–
Hg	–/–	0,71	1,00	0,51	1,31	26,39	0,15 ^b	0,04	–	–	0,5
Tl	–/–	0,001	0,002	0,007	0,001	0,038	–	–	–	–	0,1
Pb	–/–	0,02	1,01	0,05	0,11	0,32	0,03 ^b	2,65	2,10	2,50	10
Th	–/–	0,003	0,009	0,011	0,008	0,003	0,0004 ^b	0,240	–	–	–
U	–/–	0,005	0,019	0,209	0,006	0,301	3,300 ^b	1,310	–	1,240	15
K_f	–	6,2	6,8	3,8	11,9	106,8	–	–	–	–	–
$K_{c(gsz)}$	–	170,6	109,6	73,1	223,3	1252,6	–	–	–	–	–
$K_{c(gff)}$	–	130,4	91,3	49,1	275,6	492,6	–	–	–	–	–
$K_{c(gds)}$	–	194,6	131,5	54,8	218,6	468,2	–	–	–	–	–

Примечание: средние содержания в морских водах $C_{a(oc)}$ по: а) [24]; б) [25]; приводятся по [18]; в) [26]; K_f – сумма соотношений фактических и предельно допустимых концентраций веществ C_{dn} (для вод хозяйственно-питьевого назначения) первого и второго класса опасности [16] по формуле (3); с и nc – нормативы для централизованного и нецентрализованного питьевого водоснабжения; $K_{c(gsz)}$, $K_{c(gff)}$, $K_{c(gds)}$ – показатели отклонения от средних значений для подземных вод зоны гипергенеза $C_{a(gsz)}$, тропических лесов $C_{a(gff)}$ и сухих саванн $C_{a(gds)}$ по формуле (4); EC – удельная электропроводность; PO – перманганатная окисляемость; C_{org} , C_{norg} , C_{sum} – углерод органических, неорганических соединений и суммарно; N_{sum} – азот суммарно; классификация воды по [20]: C или Cl – класс воды по преобладающему аниону (гидрокарбонатные или хлоридные); Ca, Na, Mg – группа по преобладающему катиону (кальциевые, натриевые, магниевые); I, II, III – тип воды по соотношению ионов и условиям формирования химического состава воды; «–» – отсутствие данных; остальные обозначения приведены в табл. 1.

Note: average concentrations in sea waters according to: a) [24]; b) [25]; cited after [18]; c) [26]; K_f is the sum of the ratios of actual and maximum allowable concentrations of substances C_{dn} (for drinking water) of the first and second hazard classes [16] according to formula (3); c and nc are the standards for centralized and non-centralized drinking water supply; $K_{c(oc)}$, $K_{c(gsz)}$, $K_{c(gff)}$, $K_{c(gds)}$ are the indicators of deviation from the average values for the World Ocean $C_{a(oc)}$, groundwater of the supergene zone $C_{a(gsz)}$, tropical forests $C_{a(gff)}$ and dry savanna $C_{a(gds)}$ according to formula (4); EC is the electrical conductivity; PO is the permanganate oxidizability; C_{org} , C_{norg} , C_{sum} are the carbon of organic, inorganic compounds and in total; N_{sum} is the total nitrogen; water classification according to [20]: C or Cl is the class of water according to the predominant anion (carbonate or chloride); Ca, Na, Mg is the group according to the predominant cation (calcium, sodium, magnesium); I, II, III is the type of water according to the ratio of ions and the conditions for the formation of the chemical composition of water; «–» – no data; other designations are given in Table 1.

По соотношению фактических и предельно допустимых (в Российской Федерации) концентраций по показателю K_f в октября 2022 г. наилучшее качество воды в пункте В3, наихудшее – в В5, где отмечены очень высокие концентрации I, Вг и Нг (табл. 2, рис. 1). Подобная ситуация наблюдается и при сравнении по-

казателей исследуемых вод со средними показателями для подземных вод зоны гипергенеза, а также тропических лесов и засушливых саванн, условия в которых близки к условиям Восточной Явы (согласно [17], «сильный» уровень загрязнения вод в пунктах В2 и В3, в остальных пунктах «максимальный»).

С учетом этого можно сделать предварительный вывод, во-первых, о значительном хозяйственно-бытовом загрязнении грунтовых вод к юго-западу от грязевого вулкана Луси, связанном, видимо, как с поступлением в водоносный горизонт большого количества органических веществ, так и с неблагоприятными условиями их окисления (судя по содержанию C_{org} и NO_2^-). Во-вторых, влияние грязевого вулкана в целом ограничено рекой Кетапанг в северной части нарушенного участка земель и рекой Поронг (рукав реки Брантас) на юге и усиливается в направлении преобладающих уклонов земной поверхности с юга-юго-запада на север-северо-восток. В результате аварий на ограждающей дамбе и гидравлической связи поверхностных и подземных вод возможно загрязнение на прилегающих территориях (особенно пункт В4 к западу от Луси), но максимальное загрязнение следует ожидать к северу (пункт В5) и, видимо, к западу от нарушенных земель. В-третьих, район расположения пунктов А1–А5 в первом приближении можно рассматривать как условный природно-антропогенный геохимический фон при изучении влияния грязевого вулкана на содержание главных ионов, особенно хлоридов. В-четвертых, хлориды в целом в наименьшей степени (по сравнению с прочими показателями) выводятся из водной среды в результате сорбционных процессов или процессов образования и оседания малорастворимых соединений.

На основе указанных выше предположений и с использованием уравнения одномерной гидродисперсии (6) была выполнена попытка восстановления распространения ионов Cl^- с подповерхностным стоком от центра Луси в сторону реки Кетапанг:

$$k_s \cdot \frac{\partial C}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial C}{\partial x} = D_n \cdot \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}, \quad (6)$$

где C – концентрация (Cl^-), mg/dm^3 ; t и x – координаты времени (с) и расстояния (м); u – действительная скорость движения ($u = \frac{v}{n_a}$, v – скорость фильтрации, м/с; n_a – активная пористость, m^3/m^3), м/с; k_s – фактор сорбционной задержки; D_n – коэффициент поровой дисперсии ($D_n = \frac{D_m + \beta \cdot v}{n_a}$, D_m – коэффициент молекулярной диффузии, m^2/c ; β – параметр дисперсии, м), m^2/c [27]. Приближённое аналитическое решение (6) имеет вид [27, 28]:

$$C_{x,t} \approx C_b + \frac{(C_0 - C_b)}{2} \cdot \operatorname{erfc} \left(\frac{x - u \cdot t / k_s}{4 \cdot \sqrt{D_n \cdot t / k_s}} \right), \quad (7)$$

где $C_{x,t}$ – концентрация вещества в момент t на удалении x от центра Луси (на север); C_0 и C_b – условный фон и ориентировочное содержание Cl^- в центре грязевого вулкана; erfc – функция ошибок.

Фоновая концентрация C_b оценена с учётом требований [29, 30] по данным опробования в пунктах А1–А5 как верхняя граница определения среднего геометрического при уровне значимости 5 % ($C_b = \exp \left(C_{A(\ln C)} + \frac{k_{st,5\%} \cdot \sigma_{\ln C}}{N} \right)$, $C_{A(\ln C)}$ и $\sigma_{\ln C}$ – среднее арифметическое и среднее квадратическое отклонения натурального логарифма концентрации; $k_{st,5\%}$ – ордината распределения Стьюдента при уровне зна-

чимости 5 % ($k_{st,5\%} = 2,13$); $C_b = 65,0 \text{ mg/dm}^3$). Значения D_m для Cl^- приняты по зависимости от температуры воды, полученной по приведенным в [31] данным ($D_m = 1,00 \cdot 10^{-9} + T_w \cdot 4,04 \cdot 10^{-11}$, $D_m = 2,18 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2/c$ при температуре воды $T_w = 29,3^\circ C$), значения активной пористости n_a (0,492) – по данным Клэппа и Хорнберга, приведенным в [32, табл. 3.2.1] для пылеватой глины. Значения C_0 , k_s , v , β определены в среде MS Excel подбором методом общего понижающего градиента с целевой функцией в виде минимума функции $Kr = 100 \cdot \frac{|C_{obs} - C_{sim}|}{C_{obs}}$, где C_{obs} и C_{sim} – измеренные и расчетные значения характеристики ($C_0 = 1572,0 \text{ mg/dm}^3$; $k_s = 0,030 \text{ м}$; $v = 1,00 \cdot 10^{-5} \text{ м/с}$; $\beta = 1,009$; $Kr = 9,80 \cdot 10^{-5} \%$).

Анализ полученных результатов позволяет предположить, что грязевые воды в целом характеризуются как солоноватые (судя по соотношению концентраций Cl^- и суммы главных ионов, табл. 1, 2), а распространение грязевых вод от центра Луси до реки Кетапанг завершилось примерно в течение первых шести лет (рис. 2). Следовательно, даже при прекращении активности грязевого вулкана её последствия на нарушенном участке и прилегающих к нему территориях будут наблюдаться многие годы.

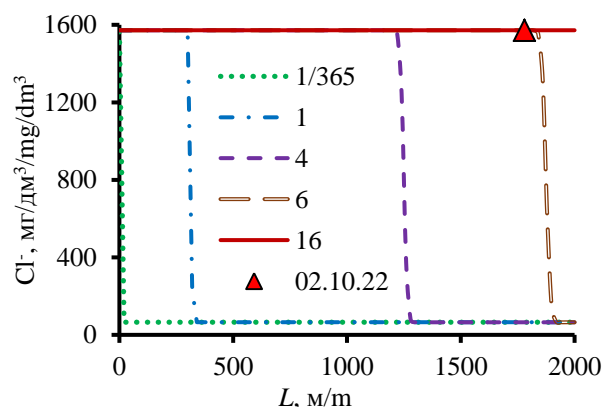


Рис. 2. Измеренные (02.10.2022) и расчетные концентрации Cl^- на различном удалении L от центра грязевого вулкана в Сидоардже 30.05.2006 (1/365), через 1, 4, 6 и 16 лет после начала первого извержения

Fig. 2. Measured (October 2, 2022) and calculated Cl^- concentrations at different distances L from the center of the mud volcano in Sidoarjo on May 30, 2006 (1/365), 1, 4, 6, and 16 years after the start of the first eruption

Содержания ряда других химических элементов по мере удаления от грязевого вулкана снижаются более существенно (табл. 2). В той или иной мере это может быть связано с осаждением малорастворимых веществ (например, карбонатов кальция и магния при наличии растворенного углекислого газа, кварца), относительно которых воды потенциально пересыщены во всех пунктах в октябре 2022 г. При этом следует отметить, что грязевые воды остаются недонасыщенными относительно многих минералов (табл. 3), что объясняется, согласно [18, 33], функционированием карбонатного барьера.

Таблица 3. Индексы насыщения грунтовых вод в округе Сидоарджо 2 октября 2022 г.

Table 3. Groundwater saturation indices in Sidoarjo district, October 2, 2022

Реакция Reaction	Пункты отбора проб (рис. 1) Sampling points (Fig. 1)				
	B1	B2	B3	B4	B5
$\text{CaCO}_3(\text{calcite}) + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + 2 \cdot \text{HCO}_3^-$	0,34	0,33	0,31	0,43	0,04
$\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2(\text{dolomite}) + 2 \cdot \text{CO}_2 + 2 \cdot \text{H}_2\text{O} = \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + 4 \cdot \text{HCO}_3^-$	1,21	1,09	1,25	1,40	0,71
$\text{SiO}_2(\text{quartz}) + 2 \cdot \text{H}_2\text{O} = \text{H}_4\text{SiO}_4^0$	0,76	0,60	0,76	0,75	0,54
$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{anorthite}) + 2 \cdot \text{H}^+ + \text{H}_2\text{O} = \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{kaolinite}) + \text{Ca}^{2+}$	-20,82	-20,58	-20,41	-20,37	-21,44
$\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8(\text{anorthite}) + 2 \cdot \text{H}^+ + 6 \cdot \text{H}_2\text{O} = \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 3 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{gibbsite}) + 2 \cdot \text{H}_4\text{SiO}_4^0 + \text{Ca}^{2+}$	-6,02	-6,10	-5,97	-6,15	-6,47
$2 \cdot \text{NaAlSi}_3\text{O}_8(\text{albite}) + 11 \cdot \text{H}_2\text{O} + 2 \cdot \text{CO}_2 = \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{kaolinite}) + 2 \cdot \text{Na}^+ + 2 \cdot \text{HCO}_3^- + 4 \cdot \text{H}_4\text{SiO}_4^0$	-6,82	-7,13	-6,87	-5,44	-6,47
$3 \cdot \text{KAlSi}_3\text{O}_8(\text{orthoclase}) + 2 \cdot \text{H}^+ + 12 \cdot \text{H}_2\text{O} = \text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}\text{OH}_2(\text{muscovite}) + 2 \cdot \text{K}^+ + 6 \cdot \text{H}_4\text{SiO}_4^0$	-19,82	-21,67	-20,68	-21,02	-21,39
$2 \cdot \text{KAl}_3\text{Si}_3\text{O}_{10}\text{OH}_2(\text{muscovite}) + 2 \cdot \text{H}^+ + 3 \cdot \text{H}_2\text{O} = 3 \cdot \text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_7 \cdot 2 \cdot \text{H}_2\text{O}(\text{kaolinite}) + 2 \cdot \text{K}^+$	0,05	-0,88	-0,84	-1,11	-0,23

Заключение

Получена предварительная оценка эколого-геохимического состояния грунтовых вод в районе грязевого вулкана в Сидоарджо по результатам обследования в 2022 г. Грунтовые воды оцениваются как: 1) пресные с повышенной минерализацией, гидрокарбонатные кальциевые, загрязненные нитритами и органическими веществами на участках вне основного направления уклона земной поверхности и движения водных масс с запада-юго-запада на восток-северо-восток, ограниченно пригодные для хозяйственно-питьевого использования (использование при условии водоподготовки); 2) солоноватые, хлоридные натриевые, с высокими содержаниями Hg, I, Br, B, не пригодные для хозяйственно-питьевого использова-

ния. Повышенные концентрации Na^+ , Cl^- , I, Br, B, предположительно, свидетельствуют об участии в формировании состава флюидов грязевого вулкана морских вод. Генезис Hg требует более детального изучения и, возможно, связан с локальными особенностями участка размещения пункта B5 (табл. 2). В целом наиболее объективным и пригодным для мониторинга показателем влияния на состояние именно грязевого вулкана является содержание Cl^- .

Для получения более достоверной оценки влияния грязевого вулкана в Сидоарджо и долгосрочного прогноза последствий этого влияния целесообразно дальнейшее исследование химического состава грунтовых вод к востоку от Луси, а также изучение состояния вод и донных отложений рек Поронг и Кетапанг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пригула Т.Ю., Ерёмин В.А., Спрыгин А.Н. Физическая география материков и океанов. – М.: ВИАДОС, 2004. – 685 с.
2. Triggering of the Lusi mud eruption: earthquake versus drilling initiation / M. Tingay, O. Heidbach, R. Davies, R. Swarbrick // *Geology*. – 2008. – V. 36. – № 8. – P. 639–643. DOI: 10.1130/G24697A.1.
3. Strike-slip faulting as a trigger mechanism for overpressure release through piercement structures. Implications for the Lusi mud volcano, Indonesia / A. Mazzini, A. Nermoen, M. Krotkiewski, Y. Podladchikov, S. Planke, H. Svensen // *Marine and Petroleum Geology*. – 2009. – V. 26. – P. 1751–1765. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2009.03.001.
4. The LUSI mud volcano triggering controversy: Was it caused by drilling? / N. Sawolo, E. Sutriyono, B.P. Istadi, A.B. Darmoyo // *Marine and Petroleum Geology*. – 2009. – V. 26. – P. 1766–1784. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2009.04.002.
5. Богоявленский В.И., Богоявленский И.В., Каргина Т.Н. Грязе-вулканическая катастрофа в Индонезии // *Бурение и нефть*. – 2017. – № 11. – С. 18–27.
6. The utilization of lapindo mud waste for aluminium sulfate production / L.I. Utami, T.S. Rizaldi, K.N. Wahyusi, R.E. Nugraha // *International Journal of Eco-Innovation in Science and Engineering* – 2020. – V. 02 (2). – P. 14–19. DOI: 10.4186/ijeise.upnjatim.ac.id/E-ISSN: 2721-8775.
7. Monitoring seawater quality in the Kali Porong estuary as an area for Lapindo mud disposal leveraging Google Earth Engine / F. Bioresita, M.H. Ummah, M. Wulansari, N.A. Putri // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 936 012011. – 2021. DOI: 10.1088/1755-1315/936/1/012011.
8. Impact of anthropogenic activity and lusi-mud volcano on fish biodiversity at the Brantas Delta, Indonesia / Y. Risjani, D.R. Santoso, J. Couteau, A. Hermawati, I. Widowati, C. Minier // *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 493012007. – 2020. DOI: 10.1088/1755-1315/493/1/012007.
9. Saputro R.A.A., Suhardjono Juwono P.T. Analysis of carrying capacity of the Porong river caused by Sidoarjo mud disposal //

- Civil and Environmental Science Journal. – 2021. – V. 4 (2). – P. 192–201. DOI: 10.21776/ub.civense.2021.00402.9.
10. Adiyaksa I.P., Sulianto A.A., Savichev O.G. Water quality assessment and risk analysis calculation of chloride and sodium exposure of well water in Tanggulangin, Sidoarjo // *Jurnal Keteknikaan Pertanian Tropis dan Biosistem*. – 2022. – V. 10 (2). – P. 92–100. DOI: 10.21776/ub.jkptb.2022.010.02.01.
11. Aquastat. Country Profile – Indonesia. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). – Rome, Italy, 2011. – 16 p. URL: <https://www.fao.org/3/ca0393en/CA0393EN.pdf> (дата обращения 03.12.2022).
12. Weight W.D. Hydrogeology field manual. 2nd ed. – USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. – 751 p.
13. Manual on stream gauging. V. I. Fieldwork. WMO. № 1044. – Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2010. – 252 p.
14. Рождественский А.В., Чеботарёв А.И. Статистические методы в гидрологии. – Л.: Гидрометеоиздат, 1974. – 424 с.
15. СП 33-101-2003. Свод правил по проектированию и строительству. Определение основных расчетных гидрологических характеристик. – М.: Госстрой России, 2004. – 72 с.
16. СанПин 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания. Утверждены Постановлением от 28 января 2021 г. № 2. Зарегистрировано в Минюсте России 29 января 2021 г. № 62296. – М.: Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. Главный государственный санитарный врач Российской Федерации, 2021. – 1025 с.
17. Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1:200 000 / отв. ред. Э.К. Буренков. – М.: ИМГРЭ, 2002. – 92 с.
18. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh Groundwater in the Main Landscape Zones of the Earth // *Geochemistry International*. – 2008. – V. 46. – № 13. – P. 1285–1398.
19. Савичев О.Г., Колоколова О.В., Жуковская Е.А. Состав и равновесие донных отложений р. Томь с речными водами // *Геоэкология*. – 2003. – № 2. – С. 108–119.

20. Алёкин О.А. Основы гидрохимии. – Л.: Гидрометеорологическое изд-во, 1970. – 444 с.
21. Справочник по гидрохимии / под ред. А.В. Никанорова. – Л.: Гидрометеоздат, 1989. – 391 с.
22. ГОСТ 27065-86. Качество вод. Термины и определения. – М.: Изд-во стандартов, 2003. – 9 с.
23. Гидрохимические показатели состояния окружающей среды / под ред. Т.В. Гусевой. – М.: ФОРУМ: Инфра-М, 2007. – 192 с.
24. Иваненков В.Н. Основной солевой состав вод океана // Океанология. Химия океана. В 2-х т. Т. 1. Химия вод океана / отв. ред. О.К. Бордовский, В.Н. Иваненков. – М.: Наука, 1979. – С. 43–48.
25. Turekian K.K. The ocean, streams and atmosphere // Handbook of Geochemistry / ed. by K.Y. Wedepohl. – Berlin; New York: Springer, 1969. – V. 1. – P. 297–323.
26. Виноградов А.П. Введение в геохимию океана. – М.: Наука, 1967. – 216 с.
27. Румынин В.Г. Теория и методы изучения загрязнения подземных вод. – СПб: Наука, 2020. – 559 с.
28. Benedini M., Tsakiris G. Water quality modelling for rivers and streams. – Dordrecht: Springer, 2013. – 288 p.
29. Инструкция по геохимическим методам поисков рудных месторождений. – М.: Недра, 1983. – 228 с.
30. РД 52.24.622-2019. Порядок проведения расчетов условных фоновых концентраций химических веществ в воде водных объектов для установления нормативов допустимых сбросов сточных вод. – Ростов-на-Дону: Росгидромет, ФГБУ «ГХИ», 2019. – 85 с.
31. Lerman A. Geochemical processes water and sediment environments. – New York: John Wesley&sons, 1979. – 481 p.
32. Гусев Е.М., Насонова О.Н. Моделирование тепло- и влагообмена поверхности суши с атмосферой. – М.: Наука, 2010. – 327 с.
33. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швец В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты / отв. ред. Н.П. Лавёров. – М.: Наука, 2004. – 677 с.

Поступила: 08.12.2022 г.

Прошла рецензирование: 22.12.2022 г.

Информация об авторах

Адьякса И.П., магистрант отделения геологии инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Савичев О.Г., доктор географических наук, профессор отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов Национального исследовательского Томского политехнического университета.

Хвощевская А.А., кандидат геолого-минералогических наук, доцент отделения геологии Инженерной школы природных ресурсов, заведующая проблемной научно-исследовательской лабораторией гидрогеохимии Национального исследовательского Томского политехнического университета.

UDC 556.388

ECOLOGICAL AND GEOCHEMICAL CONDITION OF GROUNDWATER IN THE REGION OF THE MUD VOLCANO IN SIDOARJO (EAST JAVA PROVINCE, INDONESIA)

Ilham Putra Adiyaksa¹,
ilhamadiyaksa@gmail.com

Oleg G. Savichev¹,
OSavichev@mail.ru

Albina A. Khvashchenskaya¹,
Garibova@yandex.ru

¹ National Research Tomsk Polytechnic University,
30, Lenin avenue, Tomsk, 634050, Russia.

Relevance. Since 2006, the world's largest mud volcano has been happening in the eastern part of the island of Java (Indonesia), the province of East Java, the district of Sidoarjo. The surrounding areas are densely populated, which determines the constant need for high-quality drinking water. The lack of quality water is exacerbated by the influence of a mud volcano.

The aim of the research is to assess the ecological and geochemical condition of groundwater in the area adjacent to the world's largest mud volcano in Sidoarjo (Indonesia, East Java province).

Methods: methods for determining the chemical composition of groundwater, statistical methods, as well as mathematical modeling.

Results and conclusions. The authors have obtained the preliminary assessment of the ecological and geochemical state of groundwater in the area of the mud volcano in Sidoarjo based on the results of a survey in January, February and October 2022. The result shows that groundwater in this area is assessed as: 1) freshwater with increased mineralization, bicarbonate calcium in areas outside the main direction of the slope of the earth's surface and the movement of water masses from the west-southwest to the east-northeast, limitedly suitable for domestic and drinking use (water treatment is needed for water use); 2) brackish, sodium chloride, with high contents of Hg, I, Br, B, not suitable for household and drinking use. Elevated concentrations of Na⁺, Cl⁻, I, Br, B presumably testify to the participation of marine waters in the formation of the fluid composition of the mud volcano. The genesis of Hg requires more detailed study, and, possibly, is associated with local features. In general, the most objective indicator of the impact on the state of a mud volcano is Cl⁻ content. Recommendations are given for further hydrogeochemical studies in Sidoarjo.

Key words:

mud volcano in Sidoarjo, Indonesia, groundwater, chemical composition, quality.

REFERENCES

- Pritula T.Yu., Eremina V.A., Spryalin A.N. *Fizicheskaya geografiya materikov i okeanov* [Physical geography of continents and oceans]. Moscow, VLADOS Publ., 2004. 685 p.
- Tingay M., Heidebach O., Davies R., Swarbrick R. Triggering of the Lusi mud eruption: Earthquake versus drilling initiation. *Geology*, 2008, vol. 36, no 8, pp. 639–643. DOI: 10.1130/G24697A.1.
- Mazzini A., Nermon A., Krotkiewski M., Podladchikov Y., Planke S., Svensen H. Strike-slip faulting as a trigger mechanism for overpressure release through piercement structures. Implications for the Lusi mud volcano, Indonesia. *Marine and Petroleum Geology*, 2009, vol. 26, pp. 1751–1765. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2009.03.001.
- Sawolo N., Sutriano E., Istadi B.P., Darmoyo A.B. The LUSI mud volcano triggering controversy: Was it caused by drilling? *Marine and Petroleum Geology*, 2009, vol. 26, pp. 1766–1784. DOI: 10.1016/j.marpetgeo.2009.04.002.
- Bogoyavlensky V.I., Bogoyavlensky I.V., Kargina T.N. Mud volcanic catastrophe in Indonesia. *Drilling and oil*, 2017, no. 11, pp. 18–27. In Rus.
- Utami L.L., Rizaldi T.S., Wahyuni K.N., Nugraha R.E. The utilization of lapindo mud waste for aluminium sulfate production. *International Journal of Eco-Innovation in Science and Engineering*, 2020, vol. 02 (2), pp. 14–19. DOI: 10.4186/ijeise.upnjatim.ac.id/E-ISSN: 2721-8775.
- Bioresita F., Ummah M.H., Wulansari M., Putri N.A. Monitoring seawater quality in the Kali Porong estuary as an area for Lapindo mud disposal leveraging Google Earth Engine. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 936 012011. DOI: 10.1088/1755-1315/936/1/012011.
- Risjani Y., Santoso D.R., Couteau J., Hermawati A., Widowati I., Minier C. Impact of anthropogenic activity and lusi-mud volcano on fish biodiversity at the Brantas Delta, Indonesia. *IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci.* 493012007, 2020. DOI: 10.1088/1755-1315/493/1/012007.
- Saputro R.A.A., Suhardjono Juwono P.T. Analysis of carrying capacity of the Porong river caused by Sidoarjo mud disposal. *Civil and Environmental Science Journal*, 2021, vol. 4 (2), pp. 192–201. DOI: 10.21776/ub.civense.2021.00402.9.
- Adiyaksa I.P., Sulianto A.A., Savichev O.G. Water quality assessment and risk analysis calculation of chloride and sodium exposure of well water in Tanggulangin, Sidoarjo. *Jurnal Keteknikaan Pertanian Tropis dan Biosistem*, 2022, vol. 10 (2), pp. 92–100. DOI: 10.21776/ub.jkptb.2022.010.02.01.
- Aquastat. Country profile – Indonesia. *Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)*. Rome, Italy, 2011. 16 p. Available at: <https://www.fao.org/3/ca0393en/CA0393EN.pdf> (accessed 3 December 2022).
- Weight W.D. *Hydrogeology field manual*. 2nd ed. USA, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2008. 751 p.
- Manual on Stream Gauging*. Vol. I. *Fieldwork*. WMO. No. 1044. Geneva, Switzerland, World Meteorological Organization, 2010. 252 p.
- Rozhdestvensky A.V., Chebotarev A.I. *Statisticheskie metody v gidrologii* [Statistical methods in hydrology]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1974. 424 p.
- SP 33-101-2003. *Svod pravil po proektirovaniyu i stroitelstvu. Opreделение osnovnykh raschetnykh gidrologicheskikh kharakteristik* [Code of rules for design and construction. Determination of the main calculated hydrological characteristics]. Moscow, Gosstroy of Russia Publ., 2004. 72 p.
- SanPiN 1.2.3685-21. *Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya* [Sanitary norms and rules of Russian Federation 1.2.3685-21. Hygienic standards and requirements for

- ensuring the safety and (or) harmlessness of environmental factors for humans]. Approved by Resolution No. 2 of January 28, 2021. Moscow, Federal Service for Supervision of Consumer Rights Protection and Human Welfare. Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation, 2021. 1025 p.
17. *Trebovaniya k proizvodstvu i rezultatam mnogotselevogo geokhimicheskogo kartirovaniya masshtaba 1:200000* [Requirements to multi-purpose geochemical mapping of scale 1:200000 and its results]. Moscow, IMGRE Press, 2002. 92 p.
 18. Shvartsev S.L. Geochemistry of fresh groundwater in the main landscape zones of the Earth. *Geochemistry International*, 2008, vol. 46, no. 13, pp. 1285–1398.
 19. Savichev O.G., Kolokolova O.V., Zhukovskaya E.A. Composition and balance of river sediments of the Tom river with river waters. *Geoecology*, 2003, no. 2, pp. 108–119. In Rus.
 20. Alekin O.A. *Osnovy gidrokhimii* [Bases of hydrochemistry]. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1970. 444 p.
 21. *Spravochnik po gidrokhimii* [Handbook of hydrochemistry]. Ed. by A.V. Nikanorov. Leningrad, Gidrometeoizdat Publ., 1989. 391 p.
 22. GOST 27065-86. *Kachestvo vod. Terminy i opredeleniya* [Water quality. Terms and definitions]. Moscow, Standards Publ. House, 2003. 9 p.
 23. *Gidrokhimicheskie pokazateli sostoyaniya okruzhayushchey sredy* [Hydrochemical indicators of the state of the environment]. Ed. by T.V. Guseva. Moscow, FORUM, Infra-M, 2007. 192 p.
 24. Ivanenkov V.N. *Osnovnoy solevoy sostav vod okeana* [The main salt composition of the ocean waters]. *Okeanologiya. Khimiya okeana* [Oceanology. Ocean Chemistry]. In 2 vol. Vol. 1. *Khimiya vod okeana* [Chemistry of ocean waters]. Eds. O.K. Bordovsky, V.N. Ivanenkov. Moscow, Nauka Publ., 1979. pp. 43–48.
 25. Turekian K.K. *The ocean, streams and atmosphere. Handbook of Geochemistry*. Ed. by K.Y. Wedepohl. Berlin, New York, Springer, 1969. Vol. 1, pp. 297–323.
 26. Vinogradov A.P. *Vvedenie v geokhimiya okeana* [Introduction to ocean geochemistry]. Moscow, Nauka Publ., 1967. 216 p.
 27. Romanian V.G. *Teoriya i metody izucheniya zagryazneniya podzemnykh vod* [Theory and methods of studying groundwater pollution]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2020. 559 p.
 28. Benedini M., Tsakiris G. *Water quality modelling for rivers and streams*. Dordrecht, Springer, 2013. 288 p.
 29. *Instruktsiya po geokhimicheskim metodam poiskov rudnykh mestorozhdeniy* [The instruction on geochemical methods of searching ore deposits]. Moscow, Nedra Publ., 1983. 228 p.
 30. RD 52.24.622-2019. *Poryadok provedeniya raschetov usloynykh fonovykh kontsentratsiy khimicheskikh veshchestv v vode vodnykh obyektov dlya ustanovleniya normativov dopustimyykh sbrosov stochnykh vod* [The procedure for calculating the conditional background concentrations of chemicals in the water of water bodies to establish standards for permissible wastewater discharges]. Rostov-on-Don, Roshydromet, FGBU «GHI» publ., 2019. 85 p.
 31. Lerman A. *Geochemical processes water and sediment environments*. New York, John Wesley&sons, 1979. 481 p.
 32. Gusev E.M., Nasonova O.N. *Modelirovanie teplo- i vlagobmena poverkhnosti sushy s atmosferoy* [Modelling of warm and moisture exchange of a land surface with an atmosphere]. Moscow, Nauka Publ., 2010. 327 p.
 33. Kraynov S.R., Ryzhenko B.N., Shvets V.M. *Geokhimiya podzemnykh vod: teoreticheskie, prikladnye i ekologicheskie aspekty* [Geochemistry of ground waters: theoretical, applied and environmental aspects]. Moscow, Nauka Publ., 2004. 677 p.

Received: 8 December 2022.
Reviewed: 22 December 2022.

Information about the authors

Ilham Putra Adiyaksa, master student, National Research Tomsk Polytechnic University.

Oleg G. Savichev, Dr. Sc., professor, National Research Tomsk Polytechnic University.

Albina A. Khvashchevskaya, Cand. Sc., associate professor, head of the laboratory, National Research Tomsk Polytechnic University.