

МОДЕЛИРОВАНИЕ СЕТИ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ГОРНО-ГЕОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ

КАРФИДОВА Е. А.¹, МАКЕЕВ В. М.¹, КРАВЧЕНКО И. М.¹

¹ Институт геоэкологии имени Е. М. Сергеева РАН
(Россия, г. Москва, Уланский пер., 13, стр. 2)

***Введение.** Модель сети поверхностного стока бассейна р. Усолка, расположенного в пределах Верхнекамского месторождения, создана с целью выявления зон повышенного увлажнения земной поверхности. С этими областями связывается повышенная инфильтрация пресных поверхностных вод в толщу горных пород и развитие суффозионных и карстовых процессов, которые являются опасными для горных выработок.*

***Методика проведения исследований.** Моделирование осуществлялось в среде геоинформационного проекта на программном обеспечении ESRI ArcGIS10.4 с модулями Spatial Analyst и 3D Analyst. Исходным материалом для создания модели послужили геоморфологические данные.*

***Результаты и их анализ.** В результате моделирования построена цифровая модель рельефа и модель сети поверхностного стока, определены и классифицированы локальные замкнутые понижения рельефа, выделены и классифицированы водосборные бассейны на основе их морфометрических и гидрологических показателей.*

***Выводы и область применения результатов.** Моделирование позволило выявить зоны скопления пресных вод, в пределах которых возможно развитие негативных инженерно-геологических процессов и явлений. Результаты исследований могут быть использованы при проектировании и разработке месторождений полезных ископаемых с целью обеспечения горно-геологической и геоэкологической безопасности.*

***Ключевые слова:** геоморфология; поверхностный сток; суффозия; карст; месторождение; безопасность.*

Введение. Территория Верхнекамского месторождения калийных солей (ВКМКС) находится в Пермской области в зоне сопряжения западного склона Среднего Урала и Восточно-Европейской платформы. Калийно-магниево-натриевые соли залегают в пределах Соликамской раннепермской впадины в виде крупной двояковыпуклой линзы [1]. Методы оценки поверхностного стока рассматриваются на примере бассейна р. Усолка (левый приток р. Кама), расположенного в центральной части ВКМКС. На исследуемой территории, подверженной катастрофическим провалам, подобные исследования до сих пор не проводились.

Геолого-гидрогеологические условия рассматриваемой территории характеризуются двумя особенностями: соли залегают в среднем на глубине 100 м и вверх по разрезу переходят в раннепермские терригенно-карбонатные породы, способные к выщелачиванию; водоносные комплексы в этих породах слабо изолированы друг от друга и от поверхностного водотока [2, 3].

В процессе разработки месторождений происходит техногенное изменение гидрогеологических условий и напряженно-деформированного состояния горного массива. В результате этого по контуру горных выработок может формироваться зона повышенной трещиноватости, в пределах которой породы приобретают

пониженные прочностные свойства и повышенную газофлюидную проницаемость. По этим зонам подземные воды могут проникать из надсоляной толщи в соляную, уменьшать несущую способность кровли горных выработок и вызывать образование негативных явлений. В пределах ВКМКС с 1986 г. произошло множество крупных провалов, один из которых образовался на территории Березниковского калийного производственного рудоуправления № 1 [4] (рис. 1).

Следует отметить, что одной из причин образования провалов является недостаточно полное изучение гидрологических и гидрогеологических условий территории, в особенности мало внимания уделяется развитию методов оценки поверхностного стока и закономерностям его распределения в зависимости от деформаций земной поверхности.



Рис. 1. Провал на Березниковском калийном производственном рудоуправлении № 1
Fig. 1. Soil depression on the territory of the 1st Berezniki potash production group

Методика исследований. Оценка поверхностного стока как важной составляющей изучения гидрологических условий территорий месторождений базируется на методологии цифровой картографии рельефа и морфометрии, заложенной в классических работах А. М. Берлянта, А. Н. Ласточкина, Э. А. Лихачевой, Е. М. Николаевской, К. А. Салищева, С. Н. Сербенюка, Ю. Г. Симонова, А. И. Спиридонова [5, 6], S. Jenson, I. Moore, D. Tarboton [7–9]. С развитием геоинформационных технологий появились новые подходы и методы для создания усовершенствованной модели поверхностного стока.

Модель оценки поверхностного стока бассейна р. Усолка создана в среде геоинформационного проекта на программном обеспечении ESRI ArcGIS10.4 с модулями Spatial Analyst и 3D Analyst, которые позволяют создавать и анализировать векторные и растровые данные. Векторные данные представлены в виде географических объектов (точки, линии или полигональные объекты), которые имеют координаты и определенный набор атрибутов. Растровые данные представляют собой географические объекты, разделенные на непрерывные прямоугольные или квадратные ячейки, которые покрывают координатную сетку (ГРИД). Каждой ячейке присваивается значение, которое характеризует площадь, занимаемую данной ячейкой (высота, температура или спектральное значение и т. д.) [10].

Результаты создания модели поверхностного стока. Создание модели сети поверхностного стока бассейна р. Усолка основано на выполнении шести после-

довательных этапов: 1) построение цифровой модели рельефа; 2) построение модели сети поверхностного стока; 3) выделение водосборных бассейнов; 4) расчет морфометрических и гидрологических показателей; 5) типизация водосборных бассейнов; 6) типологическая классификация локальных замкнутых понижений.

1. Цифровая модель рельефа (ЦМР) строится традиционными методами [10]. Для этого на основе имеющихся изолиний рельефа с помощью модуля 3D Analyst создается нерегулярная триангуляционная сеть земной поверхности (Triangular Irregular Networks – TIN). После построения TIN осуществляется ее выверка: определяются уклоны и экспозиции треугольников-склонов, анализируются, выделяются и исправляются области несоответствия построенной сети реальным природным условиям (места резкой смены экспозиции склонов). На основе выверенной TIN строится непосредственно ЦМР или растровая поверхность в виде регулярной координатной сети (ГРИД), каждой ячейке которой соответствует значение высоты земной поверхности. Размер ячеек ГРИД подбирается исходя из точности исходных данных и площади исследуемой территории. В данной модели использовался размер 50 x 50 м.

2. Методические основы создания модели поверхностного стока заложены в работах S. Jenson, I. Moore, D. Tarboton [7–9]. Необходимое программное обеспечение реализовано в среде ArcGIS. С помощью инструмента «Заполнение» в модуле Spatial Analyst создается ЦМР с заполнением локальных понижений, что является «идеальной» моделью для расчета стоков. Далее с помощью калькулятора растров выполняется расчет разницы между скорректированной ЦМР и исходной, что позволяет получить растровую ГРИД локальных понижений рельефа [11]. По этой ГРИД рассчитываются изолинии с сечением через 1 м и выделяются замкнутые локальные понижения с глубиной, равной 1 м и больше, и длиной более 100 м (существенной для рассматриваемого масштаба). В дальнейшем будет решаться задача дифференциации локальных замкнутых понижений (ЛЗП) относительно их глубины и локализации в рельефе.

После создания «идеальной» ЦМР необходимо определить направление стока из каждой ячейки растра. Это делается с помощью инструмента «Направление стока» в модуле Spatial Analyst на основе скорректированной ЦМР. В получаемой растровой поверхности каждой ячейке присваивается одно из восьми возможных направлений стока (С, СВ, В, ЮВ, Ю, ЮЗ, З, СЗ). Далее с помощью инструмента «Суммарный сток» в том же модуле строится растровая поверхность, каждой ячейке которой присваивается значение, равное количеству всех ячеек, из которых результирующий сток осуществляется в данную ячейку [11]. Полученный растр суммарного стока конвертируется в shape-файл полигональных объектов, для которых рассчитываются центры масс суммарного стока. Этот прием дает возможность использовать шкалу масштабируемого символа, благодаря чему переход от символа малого размера к символу большего размера наглядно показывает направление движения стоков. Для представления сети стока также необходимо задать минимальное значение суммарного стока (Min CC). Это является существенным для рассматриваемого масштаба (Min CC = 20), т. е. принимаются во внимание ячейки с суммарным стоком $20 \times 50 \times 50 \text{ м} = 50\,000 \text{ м}^2$. Результаты расчета приводятся в виде модели поверхностного стока бассейна р. Усолка (рис. 2).

3. На основе растровых поверхностей направления стока и суммарного стока с помощью соответствующего инструмента в модуле Spatial Analyst рассчитываются водосборные бассейны, которые представляются в виде полигональных объектов (рис. 2). При этом задается минимальный размер водосборного бассейна (в ячейках ГРИД). Далее производится выверка границ водосборных бассейнов: они сопоставляются с речной сетью и с точками входа и выхода суммарного

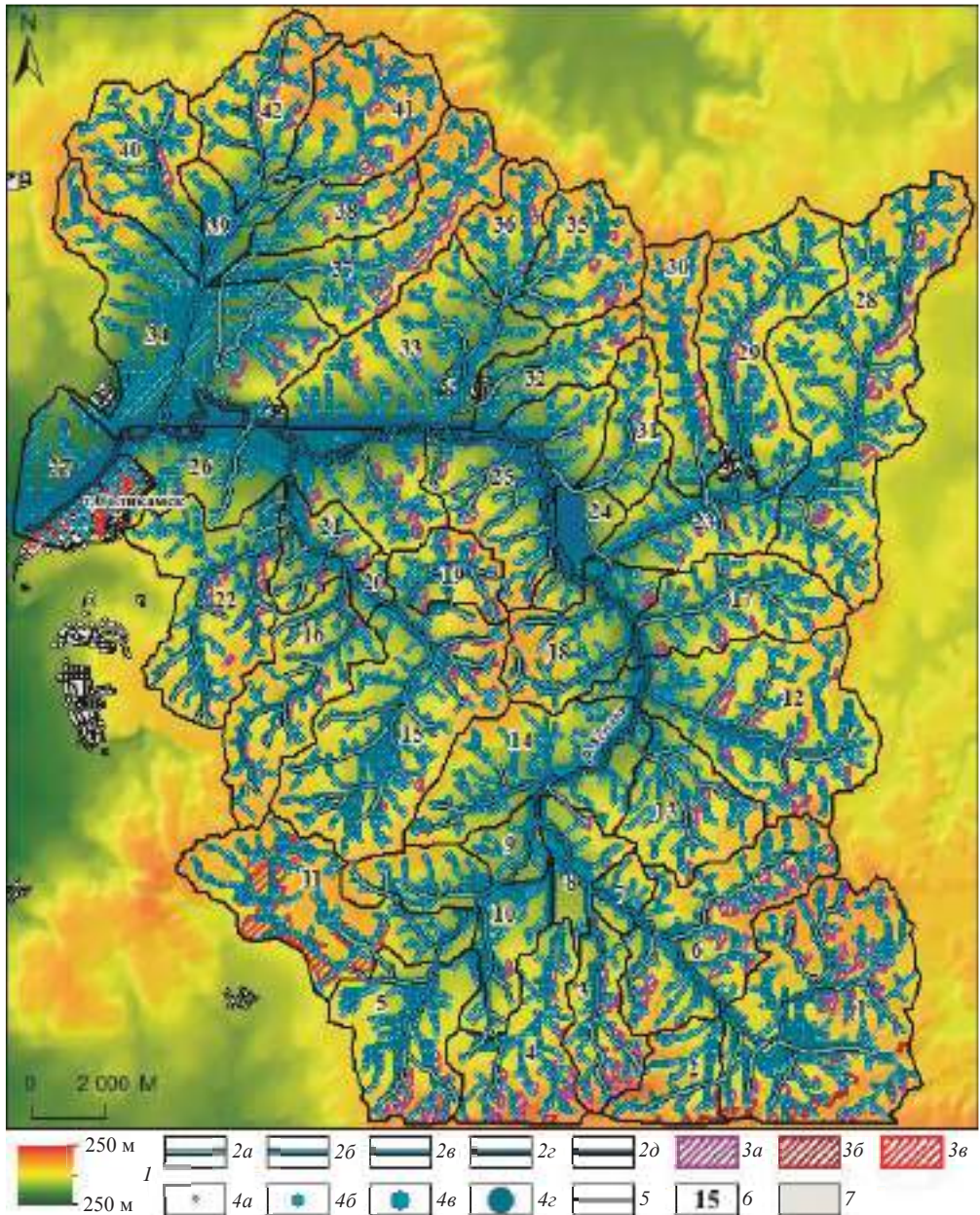


Рис. 2. Модель сети поверхностного стока бассейна р. Усолка:

1 – цифровая модель рельефа; 2a–2д – речная сеть по порядку притоков (I–V порядок); 3a–3в – локальные замкнутые понижения рельефа (склоновые, водораздельные и овражные); 4a–4г – центры масс стоков по числу ячеек-источников стока (20–7450, 7451–30626, 30627–76086, 76087–214754); 5 – границы водосборных бассейнов; 6 – номер водосборных бассейнов; 7 – инфраструктура рассматриваемой территории

Fig. 2. The model of the surface runoff network of the Usolka river basin:

1 – digital elevation model; 2a–2д – river network in order of tributaries (I–V order); 3a–3в – local closed relief depressions (slope, watershed and gully); 4a–4г – the centers of mass of the surface runoff by the number of cells-sources of runoff (20–7450, 7451–30626, 30627–76086, 76087–214754); 5 – borders; 6 – number of catchment basins; 7 – territory infrastructure

стока. В местах, где границы бассейнов неточны, чрезмерно прямолинейны или противоречат природным закономерностям, они редактируются вручную.

4. Дальнейшее изучение поверхностного стока основано на определении основных морфометрических и гидрологических показателей. Они позволяют провести сравнительный анализ водосборных бассейнов, которые подразделяются на три основных группы: начальные, срединные и устьевые. Группа начальных бассейнов объединяет водотоки 1-го и 2-го порядков, группа срединных – 3-го и 4-го порядков, группа устьевых – 5-го порядка (по системе кодирования порядков Хортонa [12]).

Расчет морфометрических и гидрологических показателей в пределах водосборных бассейнов производится с использованием функции зональной статистики модуля Spatial Analyst. Оцениваются четыре показателя: 1) изменчивость рельефа; 2) извилистость русла; 3) уклоны русла; 4) топографический индекс влажности.

1) Оценка изменчивости рельефа ERR (Elevation Ratio Relief) в пределах водосборного бассейна рассчитывается по формуле:

$$ERR = (\text{Max} - \text{Mean}) / \text{Range},$$

где Max – максимальное значение высоты рельефа; Mean – среднее значение высоты рельефа; Range – разброс значений высоты рельефа.

2) Оценка извилистости русла рассчитывается в пределах водосборного бассейна по формуле:

$$I_z = L_{\text{sum}} / L_e,$$

где L_{sum} – суммарная длина отрезков русла от точки входа до точки выхода; L_e – эвклидово расстояние между точками входа и выхода.

Для платформенных территорий обычным является снижение извилистости русла от истоков к устью. В речном бассейне Усолки извилистость русла изменяется в 3–4 раза: прямолинейные участки характерны для начальных водосборных бассейнов, извилистость увеличивается для срединных бассейнов и максимальна для устьевых бассейнов.

3) Оценка уклонов русел определяется на основе уклонов ЦМР (растра уклонов) по отношению к конкретному отрезку русла. По совокупности этих данных в пределах водосборного бассейна рассчитывается среднее значение уклонов русла. Для платформенных территорий обычным является снижение уклонов русла от истоков к устью.

4) Топографический индекс влажности (Topographic Wetness Index – TWI) рассчитывается по следующей формуле:

$$TWI = \ln(A_{\text{wsh}} / \text{tg}(\text{Slp})),$$

где A_{wsh} – суммарный сток в ячейку (безразмерная величина); Slp – уклон земной поверхности в пределах ячейки (в радианах) [13]. Наибольшие значения данного показателя характерны для водосборных бассейнов № 7, 10, 11, 23 и 26 (рис. 3).

5. Анализ сводных морфометрических показателей и оценок сети поверхностного стока позволяет рассматривать группы бассейнов (начальные (I), срединные (II) и устьевые (III)) в разных аспектах (таблица). Большую площадь водосбора речной системы Усолки занимает группа начальных водосборных бассейнов (57,6 % общей площади водосбора), одну треть занимает группа срединных бассейнов (31,4 %), группа устьевых бассейнов – только 12,0 %.

Морфометрические и гидрологические показатели водосборных бассейнов р. Усолка
Morphometric and hydrological indicators of the Usolka river catchment basins

Группа бассейнов	Номер	Входящий сток (ячейки)	Выходящий сток (ячейки)	S, км ²	Уклон русла, град	TWI	Характеристика рельефа, м				ERR	Порядок
							min	max	Range	mean		
I	1	0	11239	28,1	5,58	8,35	160	230	70	197	0,47	3
	2	0	2397	6,0	5,47	8,37	160	250	90	199	0,56	3
	3	0	2860	7,17	5,47	8,36	150	250	100	189	0,60	2
	4	0	4501	11,4	5,90	8,28	150	240	90	192	0,53	1
	5	0	4872	12,5	6,47	8,17	160	230	70	181	0,69	3
	11	0	66670	16,8	3,4	11,12	150	230	80	187	0,53	3
	13	0	3907	9,8	4,68	8,52	138	210	72	174	0,49	2
	15	0	9832	24,5	3,67	8,78	140	220	80	179	0,51	3
	16	0	5132	12,9	4,42	8,58	140	210	70	181	0,40	3
	19	0	2109	5,3	6,02	8,27	140	220	80	180	0,49	2
	22	0	6441	16,1	5,69	8,33	122	210	88	174	0,40	3
	28	0	10210	30,5	6,49	8,02	143	210	67	179	0,45	2
	29	0	6603	17,1	4,01	8,64	140	220	80	179	0,51	2
	30	0	3691	9,2	4,18	8,64	140	220	80	185	0,43	1
	31	0	2386	5,9	4,33	8,59	130	210	80	170	0,49	1
	32	0	2499	6,7	4,07	8,59	120	220	100	160	0,59	1
	35	0	3660	9,2	4,90	8,48	132	220	88	186	0,38	2
	36	0	2273	5,7	4,20	8,63	130	220	90	185	0,38	2
	37	0	8174	14,3	4,37	8,95	121	220	99	179	0,41	1
	38	0	2411	6,1	3,93	8,69	130	220	90	167	0,59	1
40	0	4576	11,4	4,23	8,62	120	220	100	178	0,41	2	

II	41	0	4775	11,9	4,60	8,54	140	220	80	195	0,31	1
	42	0	4813	10,4	4,80	8,64	134	220	86	186	0,39	2
	6	13639	15682	17,3	5,7	7,10	159	230	71	186	0,62	3
	7	15683	21517	2,2	5,3	10,25	150	190	40	167	0,56	3
	8	24400	26350	4,9	3,7	8,73	140	190	50	158	0,63	4
	9	20900	22180	3,1	3,6	8,78	140	175	35	150	0,70	4
	10	6722	16275	11,4	2,2	9,99	150	220	70	170	0,71	3
	12	58848	59263	22,1	5,2	5,35	130	220	90	175	0,49	4
	14	48556	54930	16,0	4,2	8,63	130	210	80	164	0,57	4
	17	59264	68325	11,1	5,2	9,14	130	210	80	169	0,50	4
18	72144	76086	9,9	4,6	8,52	130	220	90	167	0,58	4	
20	11957	12534	1,4	5,4	8,40	140	180	40	151	0,71	3	
21	17668	19892	5,6	4,1	8,63	122	180	58	154	0,43	4	
23	12190	26335	9,0	4,8	9,86	130	190	60	155	0,57	3	
24	102447	104162	4,3	4,6	8,52	130	210	80	144	0,82	4	
25	106626	112812	15,7	6,0	8,25	120	220	100	155	0,64	4	
33	5951	13474	18,8	3,6	8,77	120	210	90	150	0,66	4	
39	8948	10714	4,4	3,7	8,75	120	200	80	144	0,69	3	
III	26	115546	155554	18,2	5,5	10,07	110	200	90	141	0,65	5
	27	201859	205528	10,2	4,3	8,48	110	190	80	131	0,74	5
	34	19011	34771	26,0	3,8	9,14	110	220	110	142	0,71	5

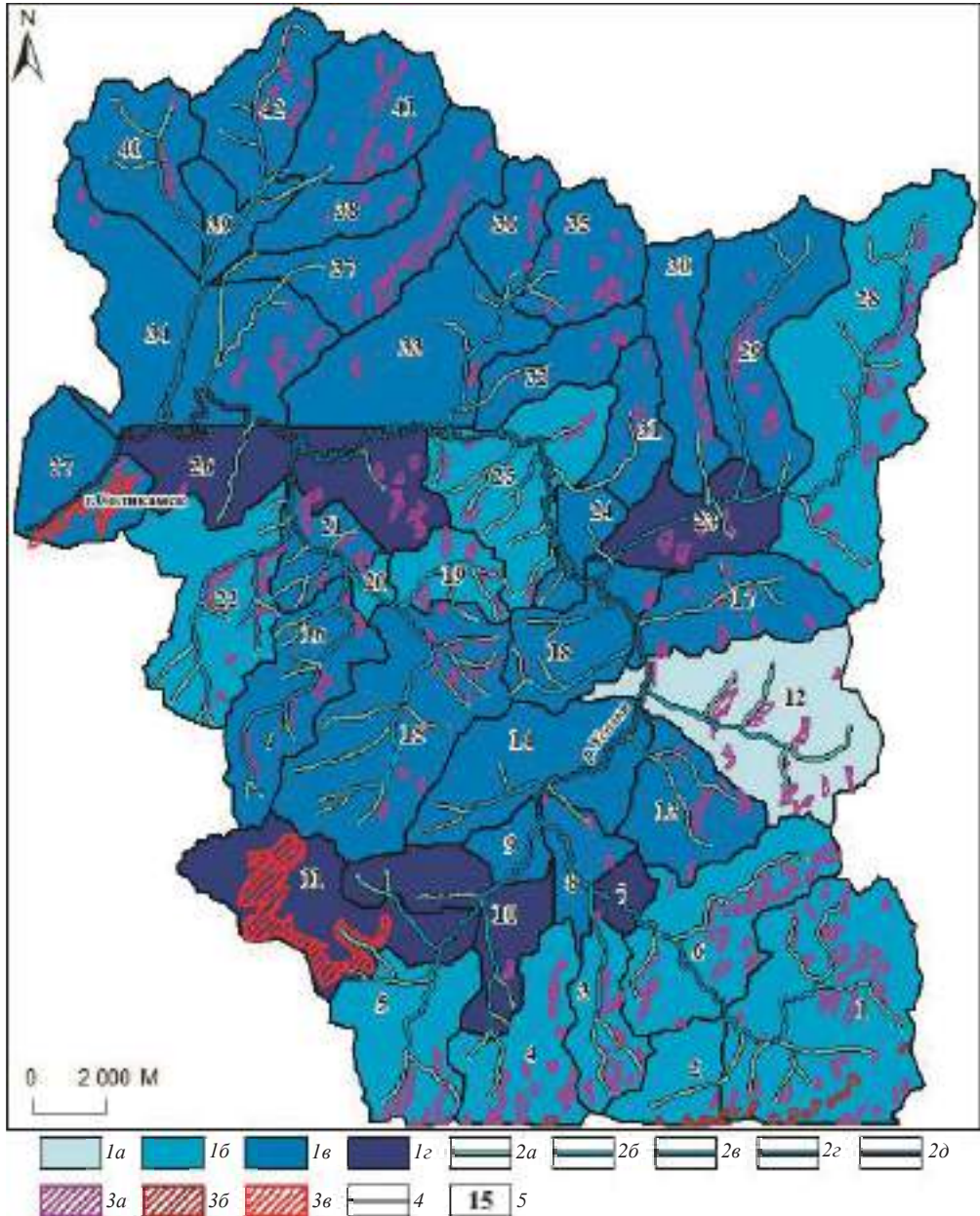


Рис. 3. Распределение топографического индекса влажности по водосборным бассейнам:
 1a–1e – значение топографического индекса влажности ($\leq 5,350$; 5,351–8,399; 8,400–9,139; 9,140–11,115);
 2a–2d – речная сеть по порядку притоков (I–V порядок); 3a–3e – локальные замкнутые понижения рельефа
 (склоновые, водораздельные и овражные); 4 – границы; 5 – номер водосборных бассейнов.
 Fig. 3. Distribution of topographic wetness index in catchment basins:
 1a–1e – the value of topographic wetness index ($\leq 5,350$; 5,351–8,399; 8,400–9,139; 9,140–11,115); 2a–2d – river
 network in order of tributaries (I–V order); 3a–3e – local closed relief depressions (slope, watershed and gully);
 4 – borders; 5 – number of catchment basins

Средние значения абсолютной высоты рельефа уменьшаются со 181,59 до 138,00; показатель изменчивости рельефа существенно увеличивается с 0,48 до 0,70; средний топографический индекс влажности увеличивается незначительно с 8,50 до 9,23. В каждой группе бассейнов различаются бассейны с низким русловым уклоном, большей извилистостью русла водотока, с низким ростом суммарного стока и большей оценкой топографического индекса влажности (см. таблицу, серый цвет). Согласно этим показателям такие бассейны относятся к особому виду накопительных водосборных бассейнов.

6. Важнейшей морфометрической особенностью исследуемой территории являются локальные замкнутые понижения. Их типологическая классификация основывается на выявлении денудационных процессов на склонах и водораздельных зонах, а также анализе овражной эрозии. Локальные замкнутые понижения рассматриваются относительно форм рельефа (бровок склонов и зон водоразделов), что позволило разделить их на три группы: 1) денудационные склоновые, 2) денудационные водораздельные и 3) овражные.

Первая группа связана с денудационными процессами в пределах склонов. Вдоль ряда водотоков располагается последовательность из узких (шириной до 130 м) и неглубоких (до 1 м) ЛЗП. В истоках такие понижения лежат между бровкой склона и руслом, а при движении по течению водотока они сдвигаются ближе к бровке. В пределах водотоков, текущих на юг, ЛЗП приурочены к левому склону, а в пределах водотоков, текущих на север – к правому.

Вторая группа ЛЗП связана с денудационными процессами, происходящими на водораздельных поверхностях. Мелкие и средние по глубине (до 3 м) и округлые ЛЗП формируются в направлении нормальном (под углом 90°) к течению водотоков и параллельно линиям водоразделов. Они устанавливаются внутри бассейнов № 1 и № 2.

Третья группа ЛЗП обусловлена овражными эрозионными процессами. Локальные замкнутые понижения, относящиеся к данной группе, присутствуют в пределах водосборных бассейнов № 11 и № 27. По глубине ЛЗП (до 10 м) и анализу спутниковых снимков можно сделать вывод о развитии здесь сильной овражной эрозии.

Выводы. Оценка сети поверхностного стока бассейна р. Усолка позволила впервые выявить границы разнотипных водосборных бассейнов, определить локальные замкнутые понижения рельефа с повышенным увлажнением, которые могут рассматриваться в качестве источников инфильтрации атмосферных вод в надсоляную терригенно-карбонатную толщу. В случае развития интенсивных тектонических деформаций эти воды могут оказаться в горных выработках. Для предотвращения подобных явлений в будущем необходимо исследовать гидравлическую связь источников повышенной инфильтрации вод с современными тектоническими деформациями надсоляной водозащитной толщи.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Макеев В. М., Макарова Н. В., Дорожко А. Л., Суханова Т. В., Коробова И. В., Бондарь И. В. Неотектоника и современная геодинамика территории Верхнекамского месторождения калийных солей // Вестник Пермского университета. 2017. Т. 16. № 4. С. 354–369.
2. О состоянии недр по территории Российской Федерации за 2015 год: информационный бюллетень. 2016. Вып. 39. 281 с.
3. Кудряшов А. И. Верхнекамское месторождение солей. Пермь: ГИ УрО РАН, 2001. 429 с.
4. Провалы грунта в Березниках. URL: <https://starcom68.livejournal.com/1016653.html> (дата обращения: 25.07.2018).
5. Берлянт А. М. Морфометрические исследования рельефа в СССР: состояние, проблемы, перспективы // Геоморфология. 1984. № 2. С. 15–17.
6. Симонов Ю. Г. Морфометрический анализ рельефа. М., Смоленск: СГУ, 1998. 272 с.
7. Jenson S. K., Domingue J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. 1988. No. 54 (11). P. 1593–1600.

8. Moore I. D., Grayson R. B., Ladson A. R. Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications // *Hydrologic Processes*. 1991. Vol. 5. No. 1. P. 3–30.

9. Tarboton D. G., Bras R. L., Rodriguez-Iturbe I. On the extraction of channel networks from digital elevation data // *Hydrological Processes*. Special Issue: Digital Terrain Modeling in Hydrology. 1991. Vol. 5. Issue 1. P. 81–100.

10. ArcGISDesktop. URL: <http://desktop.arcgis.com/> (дата обращения: 27.06.2018).

11. Карфидова Е. А., Бартак Г. И. ГИС-исследования поверхностного стока урбанизированных территорий // *ArcReview*. 2017. № 3 (82). URL: https://www.esri-cis.ru/news/arcreview/detail.php?ID=25204&SECTION_ID=1102 (дата обращения: 27.06.2018).

12. Симонов Ю. Г., Симонова Т. Ю., Кружалин В. И. Речные бассейны как объекты исследования в эколого-геоморфологическом анализе. Эколого-геоморфологические исследования. М.: МГУ, 1995. С. 184–192.

13. Topographic Wetness Index (TWI) | GIS 4 Geomorphology. URL: <http://gis4geomorphology.com/topographic-index-model/> (дата обращения: 27.07.2018).

Поступила в редакцию 11 сентября 2018 года

Для цитирования: Карфидова Е. А., Makeev V. M., Kravchenko I. M. Моделирование сети поверхностного стока для обеспечения горно-геологической безопасности Верхнекамского месторождения // *Известия вузов. Горный журнал*. 2018. № 8. С. 91–101.

Сведения об авторах:

Карфидова Екатерина Александровна – кандидат географических наук, ведущий научный сотрудник Института геоэкологии имени Е. М. Сергеева РАН. E-mail: e.karfidova@yandex.ru

Makeev Владимир Михайлович – доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник Института геоэкологии имени Е. М. Сергеева РАН. E-mail: vmakeev@mail.ru

Кравченко Илья Максимович – стажер-исследователь Института геоэкологии имени Е. М. Сергеева РАН. E-mail: kravchenkoilyamax@yandex.ru

MODELING THE SURFACE RUNOFF NETWORK TO ENSURE GEOLOGICAL SAFETY AT THE VERKHNEKAMSK DEPOSIT

Karfidova E. A.¹, Makeev V. M.¹, Kravchenko I. M.¹

¹ Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS, Moscow, Russia.

Introduction. *The model of the surface runoff network of the Usolka river basin located within the territory of the Verkhnekamsk deposit was created to identify areas of increased moisture of the earth's surface. These areas are associated with increased infiltration of fresh surface water into the rocks and the development of suffusion and karst processes that are dangerous for mining.*

The methodology of the research. *The modeling was carried out in the GIS project environment using ESRI ArcGIS 10.4 software with Spatial Analyst and 3D Analyst modules. The source material for the model is geomorphological data.*

Results and their analysis. *As a result of modeling, a digital elevation model and a model of the surface runoff network were constructed, local closed relief depressions were identified and classified; catchment basins were mapped and classified based on their morphometric and hydrological indicators.*

Conclusions and scope of the results. *Modeling has allowed to reveal zones of fresh water accumulation where development of negative engineering-geological processes and phenomena is possible. The research results can be used in the design and development of mineral deposits in order to ensure geological and geoeological safety.*

Key words: *geomorphology; surface runoff; suffusion; karst; deposit; safety.*

DOI: 10.21440/0536-1028-2018-8-91-101

REFERENCES

1. Makeev V. M., Makarova N. V., Dorozhko A. L., Sukhanova T. V., Korobova I. V., Bondar' I. V. [Neotectonics and current geodynamics at the territory of Verkhnekamsk potassium salts deposit]. *Vestnik Permskogo universiteta – Perm University Herald*, 2017, vol.16, no. 4, pp. 354–369. (In Russ.)
2. [The News Bulletin “On the State of the Subsoil at the Territory of the Russian Federation in 2015”]. 2016, issue 39. 281 p. (In Russ.)
3. Kudriashov A. I. [Verkhnekamsk potassium salt deposit]. Perm, Mining Institute of UB RAS, 2001. 429 p.
4. [Ground depressions in Berezniki]. Available at: <https://starcom68.livejournal.com/1016653.html> (Access date 25th July, 2018). (In Russ.)
5. Berliant A. M. [Morphometric study of relief in the USSR: state, problems, and prospects]. *Geomorfologiya – Geomorphology*, 1984, no. 2, pp. 15–17. (In Russ.)

6. Simonov Iu. G. [Morphometric analysis of relief]. Moscow, Smolensk, SSU Publ., 1998. 272 p.
7. Jenson S. K., Domingue J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1988, no. 54 (11), pp. 1593–1600.
8. Moore I. D., Grayson R. B., Ladson A. R. Digital terrain modeling: a review of hydrological, geomorphological and biological applications. *Hydrologic Processes*, 1991, vol. 5, no. 1, pp. 3–30.
9. Tarboton D. G., Bras R. L., Rodriguez-Iturbe I. On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrological Processes. Special Issue: Digital Terrain Modeling in Hydrology*, 1991, vol. 5, issue 1, pp. 81–100.
10. ArcGISDesktop. Available at: <http://desktop.arcgis.com/> (Access date 27th June, 2018).
11. Karfidova E. A., Batrak G. I. [Drain net modeling for urban territories with GIS]. *ArcReview*, 2017, no. 3 (82). Available at: https://www.esri-cis.ru/news/arcreview/detail.php?ID=25204&SECTION_ID=1102 (Access date 27th June, 2018). (In Russ.)
12. Simonov Iu. G., Simonova T. Iu., Kruzhalin V. I. [River basins as the subjects of investigation in ecological-geomorphological analysis. Ecological-geomorphological investigations]. Moscow, MSU Publ., 1995, pp. 184–192.
13. Topographic Wetness Index (TWI) | GIS 4 Geomorphology. Available at: <http://gis4geomorphology.com/topographic-index-model/> (Access date 27th July, 2018).

Information about authors:

Karfidova Ekaterina Aleksandrovna – Candidate of Geographical Science, leading researcher of Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS. E-mail: e.karfidova@yandex.ru
Makeev Vladimir Mikhailovich – Doctor of Geological and Mineralogical Sciences, senior researcher of Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS. E-mail: vmakeev@mail.ru
Kravchenko Il'ia Maksimovich – trainee researcher of Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS. E-mail: kravchenkoilyamax@yandex.ru
