

Карфидова Е.А., Кравченко И.М., Makeev В.М.
(Институт геоэкологии РАН)

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОЦЕНКИ ПОВЕРХНОСТНОГО СТОКА НА ПРИМЕРЕ ТЕРРИТОРИИ ВЕРХНЕКАМСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ КАЛИЙНО-МАГНИЕВЫХ СОЛЕЙ

*В ходе исследований впервые создана модель сети поверхностного стока р. Усолка, расположенной в пределах центральной части Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей (ВКМКС). В модели рассматриваются водотоки разного порядка, замкнутые локальные понижения рельефа, водосборные бассейны и их морфометрические и гидрологические показатели. Предлагаемые методы позволяют выявить зоны повышенного увлажнения, которое сопровождается увеличенной инфильтрацией поверхностных вод в толщу горных пород, что приводит к развитию суффозионных и карстовых процессов. **Ключевые слова:** геоморфология, поверхностный сток, суффозия, карст, месторождение, безопасность.*

Karfidova E.A., Kravchenko I.M., Makeev V.M. (Environmental Geosciences Institute RAS)

DEVELOPMENT OF METHODS OF EVALUATION OF SURFACE RUNOFF ON AN EXAMPLE OF THE TERRITORY OF VERKHNEKAMSK DEPOSIT OF POTASSIUM AND MAGNESIUM SALTS

*During the research for the first time a model of the surface runoff net of river Usolka, located within the central part of the Verkhnekamsk deposit of potassium and magnesium salts (VDPMS) was created. The model considers streams of different orders, closed local relief depressions, catchment basins and their morphometric and hydrological indices. The proposed methods allow to identify zones of increased moisture, which is accompanied by increased infiltration of surface water into the rocks, that leads to the development of suffusion and karst processes. **Keywords:** geomorphology, surface runoff, suffusion, karst, deposit, safety.*

Введение

Развитие методов оценки 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 и др. [1, 2, 8]. С развитием геоинформационных технологий появляются качественно новые подходы и количественные методы для создания

усовершенствованной модели поверхностного стока, определяющего режим формирования подземных вод, что крайне актуально для оценки экологической безопасности территорий месторождений полезных ископаемых [6].

Методы оценки поверхностного стока в аспекте его развития рассматриваются на примере бассейна р. Усолка (левый приток р. Кама), расположенного в центральной части Верхнекамского месторождения калийно-магниевого солей (ВКМКС). На исследуемой территории, подверженной катастрофическим провалам природно-техногенного характера, подобные работы до сих пор не проводились, что обуславливает особую актуальность темы исследования.

Территория ВКМКС находится в Пермской области, в пределах западного склона Среднего Урала, в зоне сопряжения его с Восточно-Европейской платформой. ВКМКС имеет форму крупной двояковыпуклой линзы, залегающей в разрезе Соликамской раннепермской впадины [6]. Месторождение имеет площадь около 3,6 тыс. км² [10]. Геологические запасы по каменным солям составляют 4650 млрд т, по сильвинитам — 113,2 млрд т, по карналлитовой породе — 96,4 млрд т [5], что делает это месторождение одним из крупнейших в мире, а также небезопасным с точки зрения геоэкологии.

Геологическое строение и гидрогеологические условия рассматриваемой территории характеризуются двумя важными особенностями. Во-первых, соляная толща залегает в среднем на глубине 100 м и вверх по разрезу переходит в раннепермские терригенно-карбонатные породы. Во-вторых, водоносные комплексы в этих породах слабо изолированы друг от друга и имеют гидравлическую связь как между собой, так и с поверхностным водотоком [3]. Это обуславливает возможность развития в таких породах суффозионных и карстовых процессов, о чем свидетельствует наличие следов выщелачивания в виде каверн и небольших пустот [6].

В процессе разработки месторождений происходит техногенное изменение гидрогеологических условий и напряженно-деформированного состояния (НДС) массива как разрабатываемых, так и вышележащих пород. В результате этого по контуру горных выработок может формироваться зона повышенной трещиноватости, в пределах которой породы приобретают пониженные прочностные свойства и повышенную газо-флюидную проницаемость. Это способствует прониканию подземных вод из надсолевой толщи в соляную, что приводит к уменьшению несущей способности кровли горных выработок, к образованию так называемых «коржей», появлению «капежа» и трещиноватости в охранных блоках месторождения.

В этой ситуации возможно образование негативных явлений. В пределах ВКМКС с 1986 г. поныне прои-



Рис. 1. Провал на Березниковском калийном производственном рудоуправлении № 1 [7]

зошло 10 крупных провалов [7], один из которых образовался на территории Березниковского калийного производственного рудоуправления № 1 (рис. 1).

Следует отметить, что одной из причин образования провалов является недостаточно полное изучение гидрологических и гидрогеологических условий территории и, в особенности, мало внимания уделяется развитию методов оценки поверхностного стока и закономерностям его распределения в зависимости от современных деформаций земной поверхности. Здесь подчеркнем, что питание и степень минерализации подземных вод в значительной степени зависит от распределения поверхностного стока.

Методика и результаты создания модели сети поверхностного стока бассейна р. Усолка

Модель оценки поверхностного стока в пределах бассейна р. Усолка создана по материалам научного фонда Института геоэкологии РАН (г. Москва). Моделирование осуществлялось в среде геоинформационного проекта на программном обеспечении ESRI ArcGIS10.4 с модулями Spatial Analyst и 3D Analyst. Исходными материалами для этой работы явились топографические данные в масштабе 1:50 000.

Методика оценки поверхностного стока основана на выполнении семи последовательных этапов:

1. Построение цифровой модели рельефа

Цифровая модель рельефа (ЦМР) строится традиционными методами [11]. 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 осуществ-

ляется 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 цифровая модель рельефа или растровая поверхность в виде регулярной координатной сети (ГРИД), каждой ячейке которой соответствует значение высоты поверхности Земли. Размер ячеек ГРИД подбирается исходя из точности исходных данных и площади исследуемой территории. В нашей модели использовался размер 50x50 м. На основе ЦМР в дальнейшем осуществ-

лялся расчет растровых ГРИД по основным характеристикам рельефа: его вертикального и горизонтального расчленения, величине уклона и экспозиции

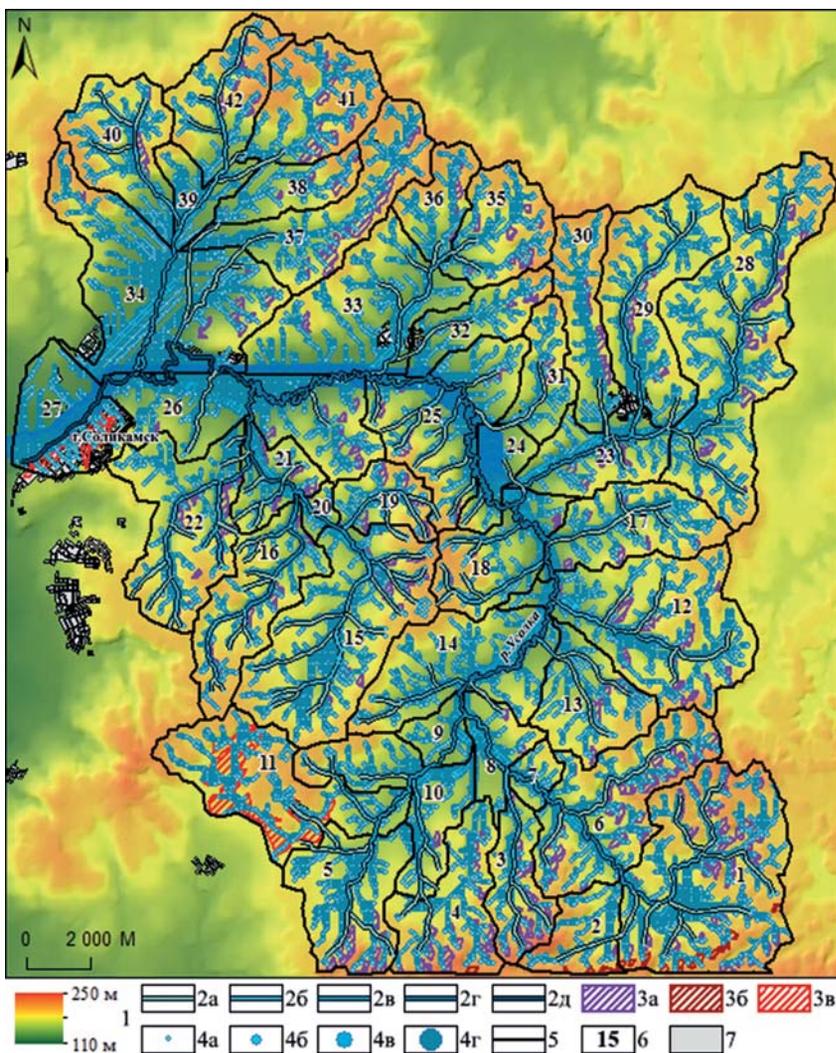


Рис. 2. Модель сети поверхностного стока бассейна р. Усолка: 1 — цифровая модель рельефа, 2а-2д — речная сеть по порядку притоков (I–V порядок), 3а-3в — локальные замкнутые понижения рельефа (склоновые, водораздельные и овражные), 4а-4г — центры масс стоков по числу ячеек-источников стока (20–7450, 7451–30626,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

склонов, а также кривизны земной поверхности (профильной, планарной и общей).

2. Построение модели сети поверхностного стока

Методические основы создания модели поверхностного стока заложены в работах S. Jenson, D. Tarboton [13, 14]. Необходимое программное обеспечение реализовано в среде ArcGIS. В начале с помощью инструмента «Заполнение» в модуле Spatial Analyst создается скорректированная 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 [4]. По этой ГРИД рассчитываются изолинии с сечением через 1 м и выделяются замкнутые локальные понижения с глубиной равной и большей 1 м 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 раstra. 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 [4]. 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 задаться минимальным значением суммарного стока (Min CC). Оно является существенным для рассматриваемого масштаба (в нашем случае Min CC = 20), т.е. принимаются во внимание ячейки с суммарным стоком $20 \cdot 50 \cdot 50 \text{ м} = 50\,000 \text{ м}^2$. Результаты расчета приводятся в виде модели сети поверхностного стока речной системы р. Усолка (рис. 2).

3. Выделение водосборных бассейнов и оценка основных характеристик речной сети

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. При этом задается минимальный размер водосборного бассейна (в ячейках ГРИД). Дополнительными ключевыми показателями водосборных бассейнов являются точки входа и выхода суммарного стока, которые также показыва-

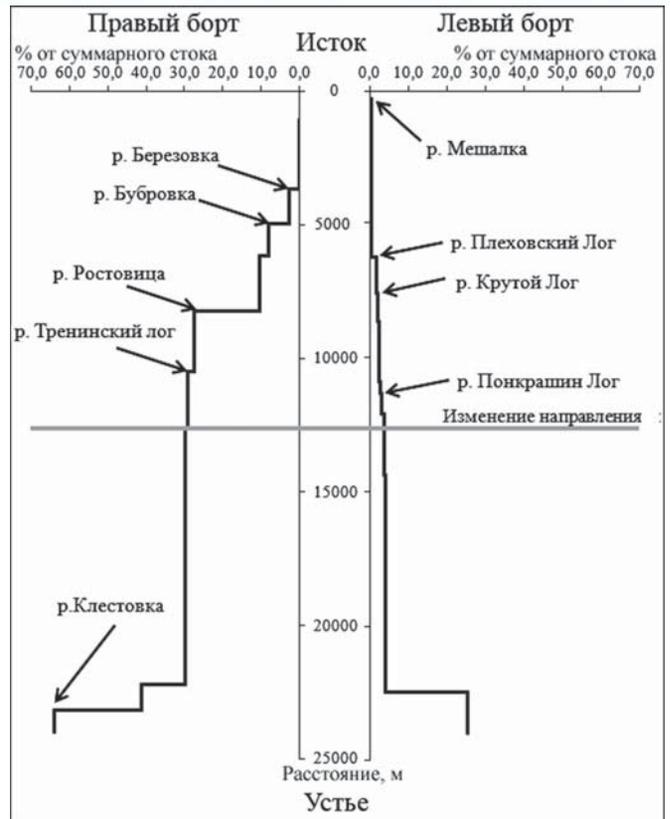


Рис. 3. Диаграмма приточности р. Усолка

ются на модели поверхностного стока. Далее производится выверка границ водосборных бассейнов: они сопоставляются с речной сетью и с точками входа и выхода суммарного стока. В местах, где границы бассейнов неточны, чрезмерно прямолинейны или противоречат природным закономерностям, они редактируются вручную.

Традиционными характеристиками структуры речного бассейна являются порядки водотоков и приточность. Порядок водотоков речной системы Усолки определяется по системе кодирования порядков Хортон [9]. Для построения графика приточности необходимо рассчитать суммарный сток бассейна р. Усолка и вклад в него основных притоков. График приточности представляется в виде диаграммы, в которой по горизонтали откладываются проценты — доля стока притоков от общего суммарного стока (раздельно для левого и правого борта), по вертикали — расстояние от истока до устья реки. Такая диаграмма приточности позволяет понять процесс формирования речной системы Усолки (рис. 3). На ней также показано изменение течения реки с меридионального направления на широтное, при этом заметно, что с изменением направления течения приточность не изменяется на протяжении 10 км.

4. Расчет морфометрических и гидрологических показателей

Развитие модели поверхностного стока основывается на определении основных морфометрических показателей рельефа, играющих ключевую роль в фор-

мировании поверхностного стока. На их основе производится сравнительный анализ водосборных бассейнов друг с другом, которые подразделяются на три основных группы по своей роли в речной системе: начальные, срединные и устьевые. Группа начальных водосборных бассейнов объединяет водотоки 1 и 2 порядка, группа срединных — 3 и 4 порядка, группа устьевых — 5 порядка.

Расчет морфометрических показателей в пределах водосборных бассейнов производится с использованием функции зональной статистики модуля Spatial Analyst. Здесь оцениваются четыре показателя: 1) изменчивость рельефа, 2) извилистость русла, 3) уклоны русла, 4) крутизна склонов.

Оценка относительной 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.

Оценка извилистости русла рассчитывается в пределах водосборного бассейна по формуле:

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

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.

Оценка уклонов русел определяется на основе уклонов ЦМР (расстра 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.

Оценка крутизны склонов определяется по триангуляционной поверхности ЦМР в пределах водосборного бассейна. Здесь рассчитывается среднее значение крутизны склонов по водосборным бассейнам.

Также для трех групп бассейнов построены графики роста суммарного стока. Здесь приводятся графики для начальных водосборных бассейнов (рис. 4) и устьевого бассейна (рис. 5). Анализ графиков позволяет установить резкое различие бассейнов накопительного вида от всех других. Линия тренда начального водосборного бассейна — это экспоненциальная функция, показывающая увеличение роста суммарного стока по направлению течения реки. Для водосборного бассейна накопительного вида производная роста меньше по сравнению со стоком характерного начального водосборного бассейна. Линия тренда здесь является кусочно-линейной с малым ростом суммарного стока. График роста суммарного стока устьевого водосборного бассейна накопительного вида (рис. 5) показывает незначительный рост суммарного стока — от ячейки со значением 110519 до ячейки со значением 115739 лежит расстояние в 10 км.

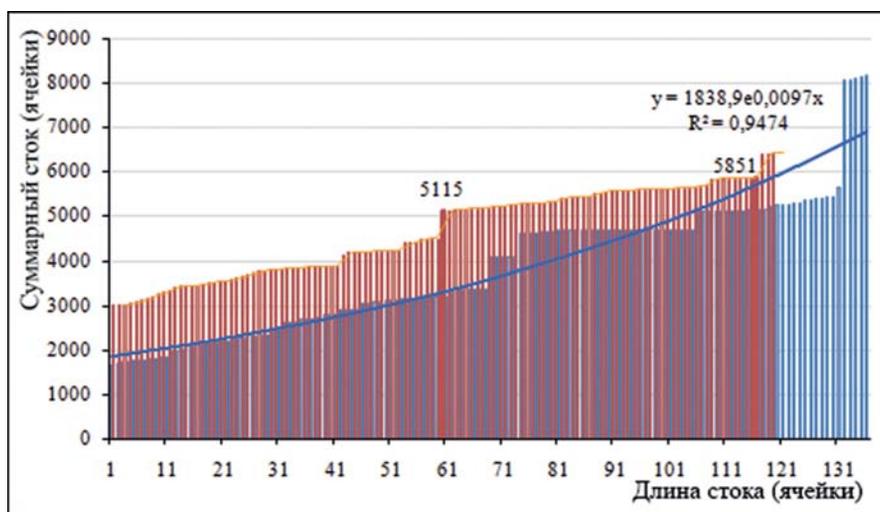


Рис. 4. Графики роста суммарного стока для группы начальных водосборных бассейнов. Синим цветом представлен график роста для характерного бассейна начальных бассейнов. Линия тренда — экспоненциальная функция. Красным цветом представлен начальный водосборный бассейн накопительного вида, линия тренда — кусочно-линейная; рост — незначительный. Цифрами показывается, что с точки суммарного стока с величиной 5115 на протяжении 60 ячеек (300 м) рост поднимается незначительно до отметки 5851

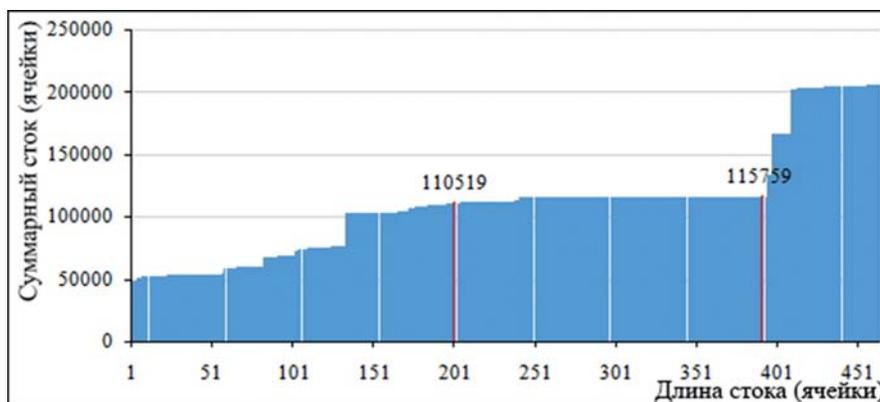


Рис. 5. Графики роста суммарного стока характерного водосборного бассейна для группы устьевых бассейнов. Линия тренда — кусочно-линейная с незначительным ростом. Цифрами показывается, что с точки суммарного стока с величиной 110519 на протяжении 200 ячеек (1000 м) рост поднимается незначительно до отметки 115739

Таблица 1

Гидрологические и морфометрические показатели по водосборным бассейнам р. Усолка

Группа бассейнов	№	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	
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	
II	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	
II	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

Таблица 2
Сводные показатели по группам водосборных бассейнов р. Усолка

Группа бассейнов	Оценка	Входящий сток (ячейки)	Выходящий сток (ячейки)	S (км ²)	Уклон русла (град)	TIW	Характеристика рельефа (м)		ERR	Порядок
							Range	Mean		
I	Средние значения	0	4971		4,89	8,50	84,09	181,59	0,48	1,95
	Сумма			289,3						
	% от общей суммы			57,6						
II	Средние значения	38017	42601		4,6	8,39	71,60	159,47	0,62	3,67
	Сумма			157,70						
	% от общей суммы			31,00						
III	Средние значения	112139	131951		4,5	9,23	93,33	138,00	0,70	5,00
	Сумма			54,40						
	% от общей суммы			10,00						

Далее рассчитывается топографический индекс влажности (Topographic Wetness Index — TWI) по следующей формуле:

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

где A_{wsh} — суммарный сток в ячейку (безразмерная величина), Slp — уклон земной поверхности в пределах ячейки (в радианах) [15]. Используя инструмент зональной статистики рассчитываются средние значения топографического индекса влажности для каждого водосборного бассейна (рис. 6).

5. Составление таблиц гидрологических и морфометрических показателей по водосборным бассейнам

На основе рассчитанных показателей составляется таблица распределения гидрологических и морфометрических показателей по водосборным бассейнам (табл. 1). Также рассчитываются сводные показатели по группам водосборных бассейнов (табл. 2).

6. Типизация водосборных бассейнов

Анализ сводных морфометрических показателей и оценок сети поверхностного стока позволяет рассматривать группы бассейнов (начальные, срединные и устьевые) в разных аспектах. 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 %. Средние значения абсолютной высоты рельефа в сравнении последовательно начальных, срединных и устьевых групп уменьшаются с 181,59 до 138,00; показатель изменчивости рельефа существенно увеличивается от 0,48 до 0,70; средний топографический индекс влаж-

ности увеличивается незначительно с 8,50 до 9,23. В каждой группе бассейнов различаются бассейны с низким русловым уклоном, большей извилистостью русла водотока, большей вогнутой кривизной,

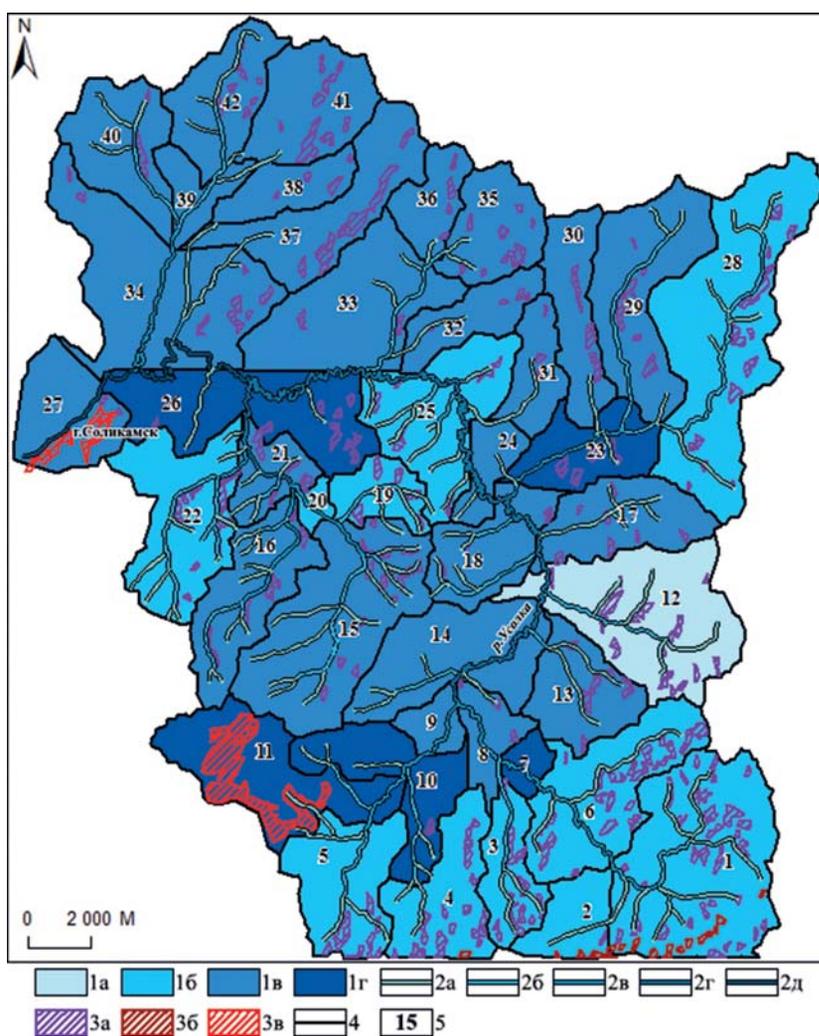


Рис. 6. Распределение топографического индекса влажности по водосборным бассейнам: 1а-1г — значение топографического индекса влажности ($\leq 5,350$, $5,351-8,399$, $8,400-9,139$, $9,140-11,115$), 2а-2д — речная сеть по порядку притоков (I-V порядок), 3а-3в — локальные замкнутые понижения рельефа (склоновые, водораздельные и овражные), 4 — границы и 5 — номер водосборных бассейнов

Таблица 3
Классификация устойчивости склонов речного бассейна р. Усолка

Класс кривизны	Класс крутизны склонов				
	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅
C ₁ C ₁ < -0,01	1	2	3	3	3
C ₂ -0,01 ≤ C ₂ ≤ 0,01	1	1	1	2	3
C ₃ C ₃ > 0,01	1	1	1	1	3

Склоны: 1 — устойчивый, 2 — условно устойчивый, 3 — неустойчивый. Крутизна склонов: от 1° до 2° — относительно плоская, от 2° до 5° — низкая, от 3° до 9° — средняя, от 4° до 12° — высокая, от 5° до 12° и выше — экстремально высокая. Формы поверхности: C₁ < (-0,01) — вогнутая, (-0,01) ≤ C₂ ≤ 0,01 — плоская, C₃ > 0,01 — выпуклая

с низким ростом суммарного стока и большей оценкой топографического индекса влажности (табл. 1, серый цвет). Согласно этим показателям такие бассейны относятся к особому виду накопительных водосборных бассейнов, в которых преобладают аккумулятивные формы рельефа.

7. Типологическая классификация локальных замкнутых понижений

Важнейшей морфометрической особенностью исследуемой территории являются локальные замкнутые понижения, значимость которых раскрывается при совместном рассмотрении сети поверхностного стока и цифровой модели рельефа. Здесь оцениваются кривизна рельефа (профильная и планарная) и потенциальная устойчивость склонов. Типологическая классификация локальных замкнутых понижений основывается на выявлении денудационных процессов на склонах

и водораздельных зонах, а также анализе овражной эрозии. Кривизна рельефа (профильная и планарная) рассчитывается с помощью соответствующей функции в модуле Spatial Analyst. Особенностью здесь является переход к нормированному представлению раstra кривизны (редкие значения за пределами 2δ, где δ — стандартное отклонение, исключаются). Профильная кривизна также подразделяется на выпуклую и вогнутую.

Оценка потенциальной устойчивости склонов с использованием модуля Smorph-Landform [12] основывается на методе, впервые предложенном в 1995 г. сотрудниками Shaw и Johnson департамента природных ресурсов США (Washington Department of Natural Resources USA), и получившем довольно широкое распространение, так как на основе анализа рельефа и расчета его морфометрических особенностей позволяет сконцентрировать проведение инженерных изысканий на выявляемых участках сомнительной (или проблемной) устойчивости склонов. Метод предполагает совместное рассмотрение оценок кривизны земной поверхности и крутизны склонов. В данной работе, основываясь на геостатистических характеристиках цифровой модели рельефа речной системы Усолки, определены значения для трех классов кривизны земной поверхности и для пяти классов крутизны склонов. Согласно используемой классификации склонов выделяются устойчивые склоны, условно устойчивые и неустойчивые (табл. 3). Условно устойчивые и неустойчивые склоны объединяются в класс проблемной устойчивости. В результате работы модуля рассчитан слой полигональных объектов с проблемной устойчивостью склонов. Используя функцию пересечения (Overlay) изолиний ЛЗП и участков проблемных склонов, выделены понижения с проблемной устойчивостью.



Рис. 7. Космоснимок (сервис Планета Земля) овражной сети в зимний период внутри застройки Соликамска на левом берегу р. Усолка

Локальные замкнутые понижения рассматриваются относительно форм рельефа (бровок склонов и зон водоразделов), что позволяет разделить их на три группы: 1) денудационные склоновые, 2) денудационные водораздельные и 3) овражные.

Образование локальных понижений первой группы связано 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 связана с вогнутой профильной кривизной и обусловлена овражными эрозионными процессами. Космоснимки, сделанные в разные сезоны, показывают, что в пределах бассейна № 27 среди жилых кварталов г. Соликамск хорошо выделяется широкая сеть мелких оврагов (рис. 7). В пределах бассейна № 11 при рассмотрении ЛЗП (глубина до 10 м) устанавливается одновременно профильная вогнутая и планарная кривизна. К сожалению, на территории бассейна находится лесной массив, что не позволяет рассмотреть овраг на космоснимке. Согласно глубине ЛЗП (до 10 м) можно сделать вывод о развитии здесь сильной овражной эрозии, с которой связан разветвленный водоток второго порядка.

Заключение

Методы оценки поверхностного стока, используемые в ходе исследований, позволили впервые оценить формирование и приточность речной системы р. Усолка на территории ВКМКС, выявить границы водосборных бассейнов и экспоненциальный характер роста суммарного стока в начальных водосборных бассейнах, определить локальные замкнутые понижения рельефа различной природы. По водосборным бассейнам рассчитаны основные морфометрические и гидрологические показатели, в т.ч. топографические индексы влажности. Методы сравнительного анализа позволили определить накопительные водосборные бассейны и локальные замкнутые понижения с неустойчивыми и условно устойчивыми склонами. Морфометрические методы оценки стока позволили дифференцировать зоны денудационных процессов (склоны с выпуклой кривизной и области локальных замкнутых понижений с проблемной устойчивостью склонов) и зоны аккумуляции поверхностных вод (водосборные бассейны накопительного вида с большой извилистостью русла водотоков, области с вогнутой кривизной рельефа, районы с большими значениями топографического индекса влажности). Зоны аккумуляции поверхностных вод ха-

рактеризуются увеличенной инфильтрацией поверхностных вод в терригенно-карбонатную толщу, что влечет за собой развитие суффозионных и карстовых процессов в последней. Эти процессы являются негативными факторами, нарушающими устойчивость подземных выработок и снижающими горно-геологическую безопасность добычи полезных ископаемых.

Описанные методы исследования поверхностного стока и определения морфометрических показателей водосборных бассейнов являются основой для дальнейших структурно-геодинамических и неотектонических исследований, направленных на выявление глубинных деформаций, выраженных в опорных горизонтах надсоляной терригенно-карбонатной толщи и кровли покровной каменной соли. Эти деформации и особенно те, которые затрагивают водозащитную надсоляную толщу, могут быть связаны с зонами аккумуляции поверхностного стока и водоносными горизонтами в виде гидравлической связи между собой. Это связь может быть одной из причин образования катастрофических провалов на территории ВКМКС.

ЛИТЕРАТУРА

1. Берлянт, А.М. Картографический метод исследований / А.М. Берлянт. — М.: МГУ, 1978. — 254 с.
2. Берлянт, А.М. Морфометрические исследования рельефа в СССР: состояние, проблемы, перспективы / А.М. Берлянт // Геоморфология. — 1984. — № 2. — С. 15.
3. Информационный бюллетень «О состоянии недр по территории Российской Федерации за 2015 год», вып. 39 // ФГБУ «Гидроспецгеология». — Москва, 2016.
4. Карфидова, Е.А. ГИС-исследования поверхностного стока урбанизированных территорий / Е.А. Карфидова, Г.И. Батрак / ArcReview 3 (82) 2017.
5. Кудряшов, А.И. Верхнекамское месторождение солей / А.И. Кудряшов. — Пермь: Ги УрО РАН, 2001. — 429 с.
6. Макеев, В.М. Неотектоника и современная геодинамика территории Верхнекамского месторождения калийных солей / В.М. Макеев, Н.В. Макарова, А.Л. Дорожко, Т.В. Суханова, И.В. Коробова, И.В. Бондарь // Вестник Пермского университета. — 2017. — Т. 16. — № 4. — С. 354–369.
7. Провалы в Березниках и Соликамске — Википедия. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Провалы_в_Березниках_и_Соликамске (дата обращения: 25.07.2018)
8. Симонов, Ю.Г. Морфометрический анализ рельефа / Ю.Г. Симонов. — Москва-Смоленск: СГУ, 1998. — 272 с.
9. Симонов, Ю.Г. Речные бассейны как объекты исследования в эколого-геоморфологическом анализе. Эколого-геоморфологические исследования / Ю.Г. Симонов, Т.Ю. Симонова, В.И. Кружалин — М.: МГУ, 1995. — С. 184–192.
10. Соловьев, В.А. Разработка калийных месторождений: практикум / В.А. Соловьев, А.И. Секунцов. — Пермь: Перм. нац. исслед. политех. ун-т, 2013. — 265 с.
11. ArcGISDesktop. URL: <http://desktop.arcgis.com/> (дата обращения: 27.06.2018).
12. Jenness Enterprises. URL: <http://www.jennessent.com> (дата обращения — 27.07.2018).
13. Jenson, S.K. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing 54 (11) / S.K. Jenson., J.O. Domingue. — 1988. — P. 1593–1600.
14. Tarboton, D.G. On the extraction of channel networks from digital elevation data / D.G. Tarboton, R.L. Bras, I. Rodriguez-Iturbe // Hydrological Processes. Special Issue: Digital Terrain Modelling in Hydrology. — Vol. 5. — Issue 1. — PP. 81–100. — January/March.
15. Topographic Wetness Index (TWI) | GIS 4 Geomorphology. URL: <http://gis4geomorphology.com/topographic-index-model/> (дата обращения: 27.07.2018).

© Карфидова Е.А., Кравченко И.М., Макеев В.М., 2019

Карфидова Екатерина Александровна // e.karfidova@yandex.ru
Кравченко Илья Максимович // kravchenkoilyamax@yandex.ru
Макеев Владимир Михайлович // vmakeev@mail.ru