

МЕТОДИКА НАУЧНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

УДК 911.52:556.314:910.25

В. П. ПЕТРИЩЕВ, А. А. ЧИБИЛЁВ, Ж. Т. СИВОХИП

Институт степи УрО РАН, г. Оренбург

КЛАСТЕРНАЯ ДИФФЕРЕНЦИАЦИЯ РОДНИКОВЫХ ВЫХОДОВ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ЮЖНОМ ПРИУРАЛЬЕ

Предлагается новый метод кластерной дифференциации 0-мерных ландшафтов, к которым относятся родниковые урочища. Данный метод, при использовании разнообразных параметров подземных вод, топологии и ландшафтной приуроченности родников, позволяет провести их ландшафтно-топологическую ординацию в соответствии с региональными ландшафтообразующими факторами.

Ключевые слова: кластер, корреляция, родниковое урочище, гидрогеохимическая аномалия, дебит.

We suggest a new cluster differentiation technique for 0-dimensional landscapes which include spring stows. Based on using the various parameters of groundwater, topology and landscape-specific occurrence of springs, this method permits their landscape-topological ordination to be carried out in accordance with regional landscape-forming factors.

Keywords: cluster, correlation, spring stow, hydrogeochemical anomaly, discharge of spring.

Южное Приуралье представляет собой одну из природных областей, в пределах которых, с одной стороны, сочетаются платформенные и складчатые условия геологического развития [1], а с другой — происходит смена семигумидных климатических условий на семиаридные. Результат этого — сложное сочетание природных факторов, проявляющихся в том числе на разнообразии родниковых урочищ. Южное Приуралье по гидрогеологическому районированию относится к Предуральской провинции (бассейну подземных вод), которая с юга примыкает к Прикаспийской провинции. По условиям формирования подземных вод — это система артезианских бассейнов платформенного типа с преимущественным развитием напорных пластовых и трещинно-пластовых вод.

Учитывая высокую вариабельность параметрических характеристик родников, апробирована их кластерная группировка с построением иерархических уровней. Для проведения кластерного анализа отбиралось максимально возможное количество переменных, которые характеризовали самые различные направления сельского хозяйства и социальной жизни села. Число выделяемых кластеров лимитировалось соотношением внутри- и межкластерных сумм квадратов расстояний. Таким образом, отбиралось число групп, которые были различными настолько это возможно. Различия между кластерами, расположенными на возможно больших расстояниях друг от друга, определялись в данном случае методом К-средних. Его алгоритм основан на том, чтобы минимизировать изменчивость внутри кластеров и максимизировать изменчивость между ними. В этом случае значения F-статистики, полученные для каждого измерения, — индикатор того, насколько хорошо соответствующее измерение дискриминирует кластеры. Для кластерной дифференциации использовались возможности программы STATISTICA 6.0.

При кластеризации родниковых выходов четко прослеживается дифференциация их параметров соответственно подпровинциям (бассейнам подземных вод), а также основным водоносным комплексам. Высотное расположение родниковых выходов связано в целом с геоморфологическим уклоном местности. В Южном Предуралье отмечается закономерное снижение их абсолютных отметок с се-

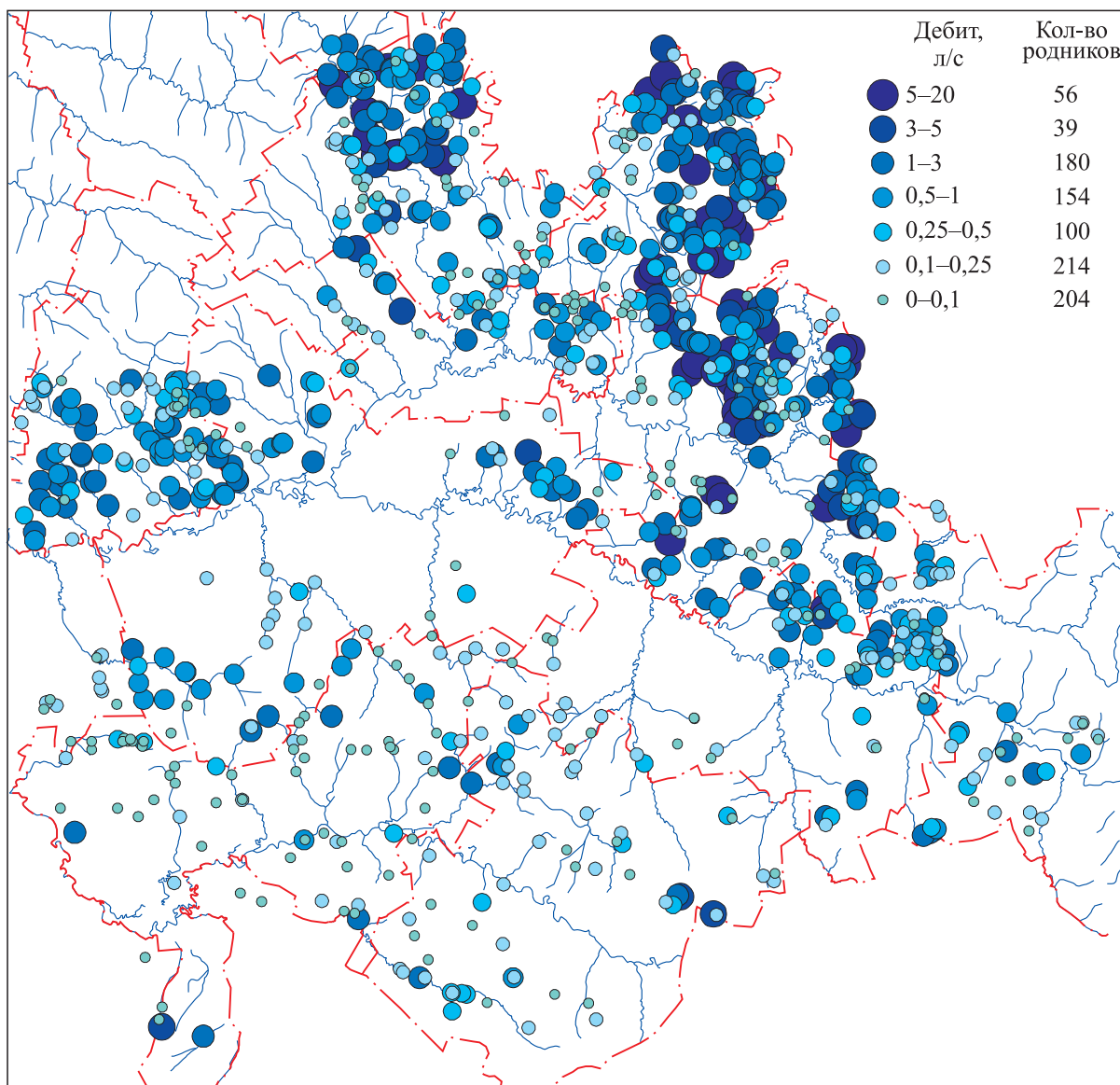


Рис. 1. Пространственное изменение водообильности (дебита).

веро-востока на юго-запад, т. е. в сторону Прикаспийской низменности. Рисунок распределения родников по высотным уровням соответствует основным орографическим направлениям Предуральского сырта и Подуральского плато. Подавляющее большинство родников расположено на высотах 100–200 (48,8 %) и 200–300 (40,3 %) м над ур. моря, что соответствует преимущественно склоновым элементам рельефа. Только 9,1 % располагается на верхних геоморфологических уровнях.

Отмечается повышение степени минерализованности родниковых вод в южном направлении (рис. 1). Причина этого, с одной стороны, — увеличение содержания минеральных солей в водоносных комплексах, генетически связанных с морскими трансгрессиями (акчагыльский и апшеронский ярусы неогена) и их повышенным распространением на Подуральском плато, особенно в пределах Прикаспийской низменности, а с другой — высокое содержание солей в известняках, мергелях и доломитах казанского и уфимского ярусов верхней перми, выходящих на поверхность как в соответствии с региональной геологической стратификацией, так и в результате прорывных процессов под действием соляной тектоники (рис. 2).

Распределение типов родников на территории Южного Приуралья определяется как геоморфологическими, так и гидрогеологическими причинами. Восходящие родники приурочены к верхним частям водоразделов, и их размещение повторяет основные орографические линии Приуралья. Пластовые выходы сосредоточены преимущественно в северо-восточной части района исследований, тем самым фиксируя наиболее водообильные горизонты подземных вод.

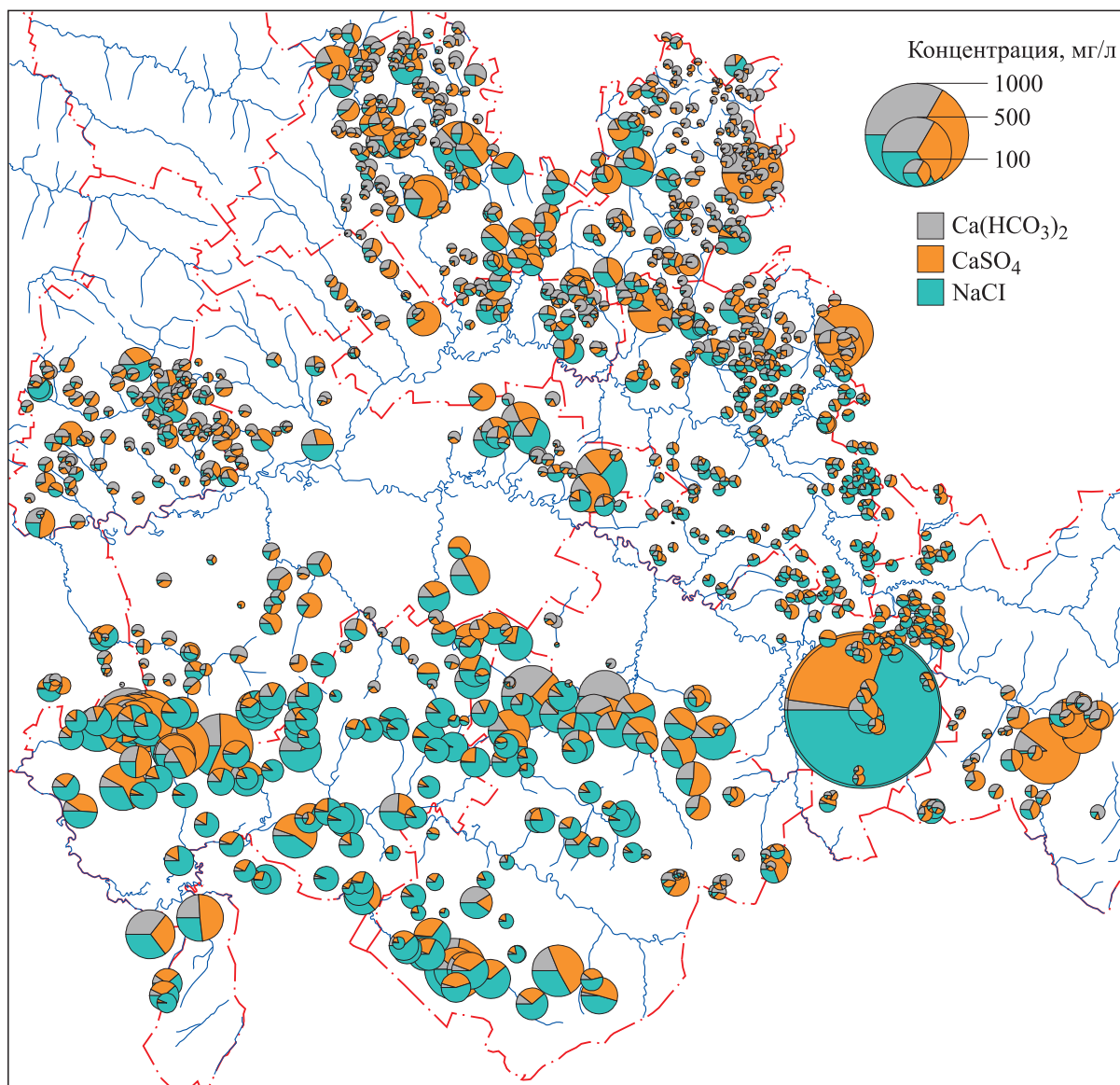


Рис. 2. Соотношение концентраций гипотетических солей в родниковых водах.

Основным фактором, определяющим дебитность родников, являются климатические условия. Вследствие различий в количестве выпадающих атмосферных осадков и степени геоморфологической расчлененности модуль родникового стока на Предуральском Сырте в 16 раз выше, чем в Подуралье (2080 и 130 м³/км² в год соответственно). Самые крупные по дебиту родники располагаются в низкогорьях Мал. Накаса и Саракташского холмогорья, что связано с наибольшим количеством выпадающих осадков.

Анализ корреляционных соотношений между параметрами родниковых вод в целом отражает взаимосвязь между их гидродинамическими и гидрохимическими свойствами. Обнаруживается тесная корреляционная связь между гидравлическим типом родника и его геоморфологическим положением. Тип родника — один из интегральных показателей, оказывающих влияние на большинство параметров. В частности, родники восходящего типа имеют важную геохимическую особенность — повышенное содержание иона Mg и сульфата натрия, что также проявляется и в расположении родника на более высоких геоморфологических уровнях. С минерализацией связана еще одна зависимость: в родниках с высокоминерализованными водами отмечается повышенное содержание как хлорида натрия, так и гидрокарбонатов магния и натрия. Причем в первом случае это проявляется в родниковых водах Подуральского плато, а во втором — Предуральского сырта (табл. 1).

В результате итерации количества кластеров установлено, что наиболее приемлема дифференциация на восемь кластеров. Критериями выбора было сопоставление межгрупповой и внутригрупповой

Таблица 1

Коэффициенты корреляции между основными параметрами родниковых выходов

| Параметры родниковых вод | Катионно-анионный состав | | | | | | Гипотетические соли | | | | | | Гидрогеологические параметры | | | |
|------------------------------------|--------------------------|------|------|-----------------|------------------|------------------------------------|------------------------------------|--------------------|-------------------|---------------------------------|-------|-------|------------------------------|-------------------|---------------|--|
| | Ca | Mg | Cl | SO ₄ | HCO ₃ | Ca(HCO ₃) ₂ | Mg(HCO ₃) ₂ | NaHCO ₃ | CaSO ₄ | Na ₂ SO ₄ | NaCl | Дебит | Гидравлический тип | Высокое положение | Минерализация | |
| Na | 0,36 | 0,26 | 1,00 | 0,39 | -0,04 | 0,06 | 0,25 | 1,00 | 0,39 | 0 | 1,00 | -0,03 | 0 | -0,01 | 0,65 | |
| Ca | | 0,48 | 0,38 | 0,46 | 0,03 | 0,70 | 0,45 | 0,36 | 0,46 | -0,02 | 0,38 | -0,01 | -0,02 | -0,03 | 0,70 | |
| Mg | | | 0,29 | 0,21 | 0,28 | 0,36 | 0,99 | 0,26 | 0,21 | 0,27 | 0,29 | -0,04 | 0,27 | 0,26 | 0,57 | |
| Cl | | | | 0,37 | -0,05 | 0,07 | 0,28 | 1,00 | 0,37 | 0 | 1,00 | -0,02 | 0 | 0 | 0,69 | |
| SO ₄ | | | | | | 0,44 | 0,20 | 0,39 | 1,00 | -0,01 | 0,37 | -0,04 | -0,01 | -0,02 | 0,18 | |
| HCO ₃ | | | | | | 0,22 | 0,26 | -0,04 | 0 | -0,08 | -0,05 | -0,04 | -0,08 | -0,08 | -0,02 | |
| Ca(HCO ₃) ₂ | | | | | | | 0,33 | 0,06 | 0,44 | 0,07 | 0,07 | -0,05 | -0,05 | -0,05 | 0,18 | |
| Mg(HCO ₃) ₂ | | | | | | | | 0,25 | 0,20 | 0,28 | 0,04 | -0,04 | 0,40 | 0,38 | 0,57 | |
| NaHCO ₃ | | | | | | | | | 0,39 | 1,00 | 0,03 | -0,03 | 0 | -0,01 | 0,65 | |
| CaSO ₄ | | | | | | | | | 0 | 0,37 | 0,04 | -0,04 | -0,01 | -0,02 | 0,18 | |
| Na ₂ SO ₄ | | | | | | | | | -0,01 | | 0,02 | 0,02 | 0,99 | 1,00 | 0 | |
| NaCl | | | | | | | | | | | -0,02 | 0 | 0 | 0 | 0,69 | |
| Дебит | | | | | | | | | | | | | 0,02 | 0,03 | -0,03 | |
| Гидравлический тип | | | | | | | | | | | | | | 0,99 | 0,02 | |
| Высотное положение | | | | | | | | | | | | | | | -0,05 | |

дисперсии, а также значение F-фактора. Выделено восемь групп родников, в состав которых входят 1053 естественных источника подземных вод (рис. 3). Кластеры характеризовались различиями по трем категориям: гидрохимическим классам, гидрологическим особенностям и пространственному расположению. Особенности выявленных группировок родниковых выходов оказались следующими.

Кластер I образует небольшая группа из 18 родников, которые характеризуются высоким дебитом — превышение средних показателей почти в 14 раз. Состав воды в таких источниках, как правило, гидрокарбонатный кальциевый и натриевый. Выделенный кластер объединяет гидрологические аномалии родников, которые территориально размещены преимущественно на Сакмаро-Бельском междуречье. Половина из гидрологических аномалий расположена в пределах изолированных сыртовых холмов эрозионно-денудационного происхождения, которые представляют собой проявление в рельефе блоков красноцветных пород перми и триаса, заключенных между древними мульдами оседания. Высокий дебит родников обусловлен высокой водообильностью верхнепермских и нижнетриасовых водоносных горизонтов, которые вскрываются секущими тектоническими разломами вдоль бортовых крыльев блоков надсолевых пород, как правило, на склонах окаймляющих их балок и оврагов.

Кластер II образуют родники с пресной водой гидрокарбонатного состава, вскрывающиеся на наиболее приподнятых геоморфологических уровнях Южного Предуралья. Родники данного кластера характеризуются высоким дебитом (в 5,5 раз выше средних показателей). Их общее количество — 52, что позволяет отнести их к фоновым гидрогеологическим объектам, формирующим гипсометрически верхний уровень родниковых ландшафтов.

В кластере III собрано 123 родника, расположенные на нижних гипсометрических этажах и выделяющиеся по уровню содержания сульфатов (почти в два раза выше средних значений по региону). При повсеместном распространении родники данного кластера образуют районы повышенной концентрации в зоне выклинивания гипсоносных пород кунгурского яруса перми. Родники характеризуются достаточно высокой минерализацией с превышением в полтора раза средних показателей и крайне малой дебитностью (в три раза меньше средних значений).

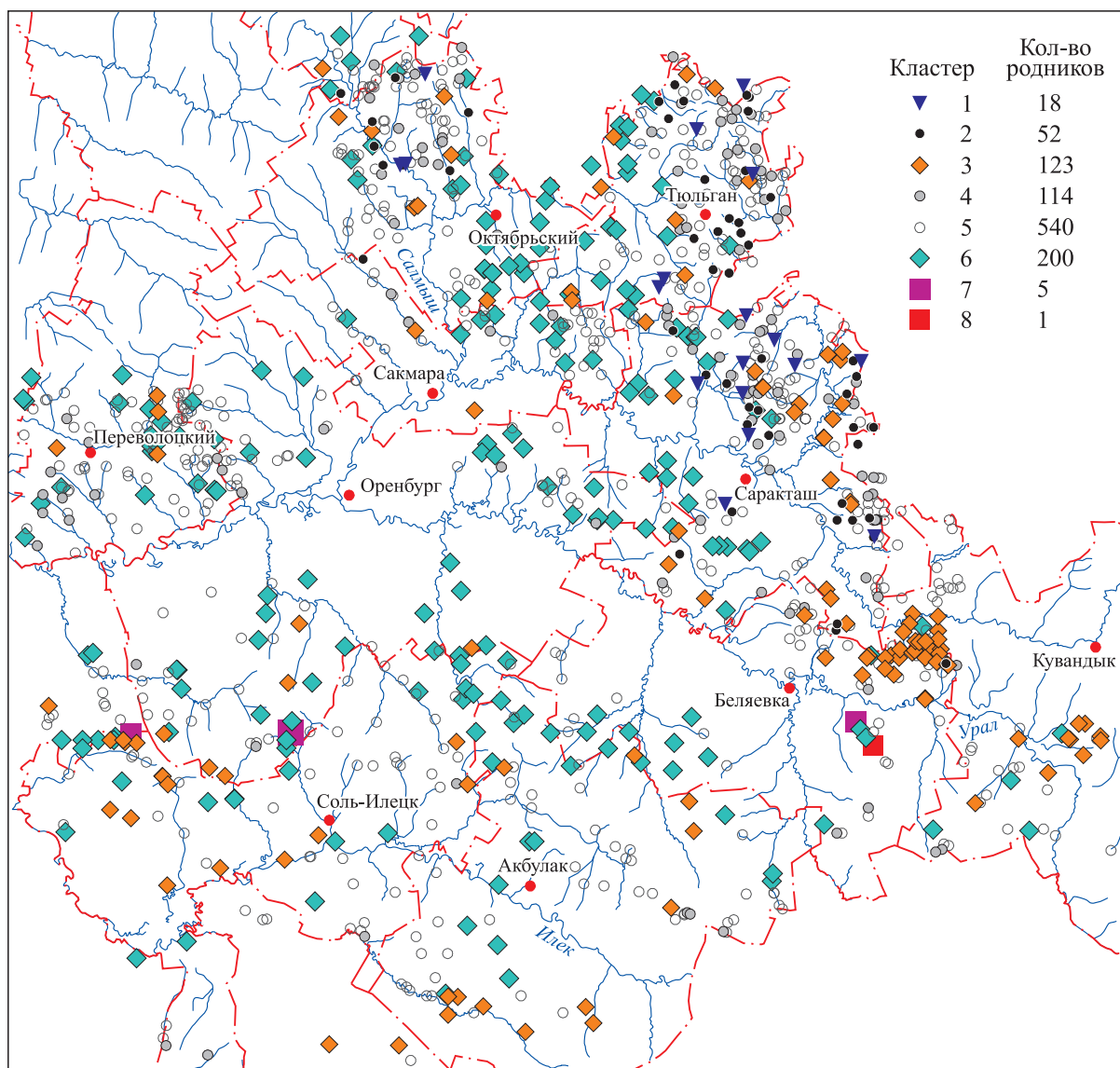


Рис. 3. Кластерная дифференциация родниковых урочищ (превышение параметров родников в кластере над среднерегиональными значениями).

H — среднерегиональное значение показателя. Родники: 1 — гидрологические аномалии (дебит — $137 H$, содержание гидрокарбонатов — $1,1 H$, гипсометрическое положение — $1,2 H$); 2 — водоразделов низкогорий и гряд с гидрокарбонатной минерализацией (дебит — $5,5 H$, содержание гидрокарбонатов — $1,1 H$, гипсометрическое положение — $1,2 H$); 3 — террас и плакоров с водами сульфатного состава (содержание сульфатов — $1,9 H$, минерализация — $1,4 H$); 4 — сыртовых увалов и склонов низкогорий с гидрокарбонатной минерализацией (дебит — $2,1 H$, содержание гидрокарбонатов — $1,1 H$, гипсометрическое положение — $1,2 H$); 5 — террас и плакоров с гидрокарбонатной минерализацией (содержание гидрокарбонатов — $1,1 H$, гипсометрическое положение — $1,0 H$); 6 — террас и плакоров с водами хлоридного состава (содержание хлоридов — $2,1 H$, минерализация — $1,1 H$). Гидрохимические аномалии: 7 — соляных диапиров (содержание хлоридов — $2,9 H$, минерализация — $22,4 H$); 8 — соляной антиклинали (содержание хлоридов — $4,1 H$, минерализация — $132 H$).

В кластер IV сгруппированы родники среднего гипсометрического уровня, представленные повсеместно на изученной территории. Это высокодебитные родники (превышение средних показателей в два раза) с гидрокарбонатным составом воды. В ландшафтном отношении родники этого кластера располагаются на водоразделах Предуралья и Слудных гор. Меньше их на Подуральском плато в связи с небольшой высотой Урало-Илекского водораздела. Общее количество родников, составляющих кластер — 114, что позволяет отнести их, так же, как и предыдущие, к фоновым гидрогеологическим объектам.

Наиболее многочислен по количеству объектов кластер V, в нем обособлены 540 родников с крайне малым дебитом (в три раза меньше средних показателей), пресными водами с гидрокарбонатным составом. Источники данного кластера, в котором собрано более половины родников Южного

Приуралья, представляют собой основную типоморфную группировку региона. Их размещение связано преимущественно со склонами водоразделов, с водораздельными балками и оврагами, а также с придолинными плакорами и террасами.

В кластере VI числится 200 родников, выделяющихся по хлоридному составу воды (в 2,2 раза выше среднерегиональных данных), малодобитности (втрое ниже среднего значения) и низкой минерализации. Источники этого кластера, так же, как IV и V, расположены на низких гипсометрических уровнях и образуют группу родников, формирующих аккумулятивные и супераквальные гидрохимические фации, т. е. нижние гипсометрические этажи, и различаются по гидрохимическому классу.

Таким образом, в IV, V и VI кластерах объединены родники гидрокарбонатного класса, расположенные на различных гипсометрических уровнях и составляющие 70 % родниковых урочищ Южного Приуралья.

Кластер VII включает только один родник, находящийся в долине руч. Тузлук-Куль (Соленый ручей) и характеризующийся аномально высокой минерализацией (превышение среднего по региону значения в 132 раза) и резким преобладанием хлоридных солей (превышение среднерегионального значения в четыре раза). Высокая гидрохимическая аномальность родника определяется его положением в пределах открытого соляного ядра активизированной Тузлук-Кульской соляной антиклинали.

Кластер VIII включает пять родников, размещение которых связано с активными соляными поднятиями: Линевским, Боевогорским и Тузлук-Кульским [3]. Родники данного кластера характеризуются также высокой минерализацией (превышение среднего по Южному Предуралью показателю в 22 раза) и высоким содержанием хлоридов (превышение в 2,9 раза). Родники, составляющие этот кластер, расположены либо на краевых участках соляных антиклиналей (Тузлук-Кульская), либо в пределах закрытых соляных диапиров и штоков. Это обстоятельство определяет более высокое содержание сульфатов в родниковых водах по сравнению с охарактеризованным выше кластером и свидетельствует о воздействии гипсовых кепроков на подземные воды. Таким образом, родники кластеров VII и VIII могут быть отнесены к категории гидрохимических аномалий, формирование которых связано с соляной тектоникой. Прорывной характер соляных поднятий, трансформирующих геологическое строение и поверхность ряда районов Южного Предуралья, оказывает метаморфизирующее воздействие на родниковые воды.

Аномальные выходы родниковых вод формируют надрегиональные иерархические таксоны, которые выделяются как резко отличающимися от среднерегиональных значениями определенного гидрохимического и гидрологического параметров, так и их совокупной аномальностью.

Среди выявленных иерархических уровней выделяется две группы: аномальные родники, подразделяющиеся на гидрохимические и гидрологические аномалии, и фоновые, которые делятся по гипсометрическому положению на три уровня — водораздельный, склоновый и равнинно-террасовый. При этом в составе последнего выделяются отдельно родники хлоридной, сульфатной и гидрокарбонатной минерализации, в то время как у двух предыдущих — только гидрокарбонатной (табл. 2).

Характеризация иерархические соотношения между полученными кластерами, следует сразу выделить три из них, которые сформированы гидрохимическими и гидрологическими аномалиями. Несмотря на незначительное количество источников (2,2 % от общей численности в изучаемом регионе), каждый из кластеров аномальных родников настолько сильно отличается от других, что формирует самостоятельный иерархический уровень. При этом по степени контрастности (среднее значение евклидовых расстояний между совокупными показателями кластеров) последовательно выделяются I, затем II и, наконец, III кластеры. Остальные — фоновые, иерархически образуют две системы, обособленные либо по гидрохимическим признакам, либо по гипсометрическим.

Гидрохимические уровни образованы родниками с гидрокарбонатным (67 %), сульфатным (11,7 %) и хлоридным (19 %) составом. Гипсометрические ярусы дифференцированы на верхний (5 %), средний (10,8 %) и нижний (81,9 % родников). Следует отметить следующую закономерность: родники с гидрокарбонатным составом воды, как правило, располагаются гипсометрически выше, ниже размещаются сульфатные источники подземных вод, еще ниже — родники с преобладанием хлоридной минерализации, что в целом отражает растворимость солей и их миграционную подвижность. Таким образом, гидрохимические ярусы родниковых урочищ в Южном Предуралье обусловлены сопряженностью родников гидрокарбонатного класса с различными гидрохимическими фациями, сульфатного — преимущественно с трансэлювиальными и трансаккумулятивными, хлоридного — с аккумулятивными и супераквальными.

Выявлены следующие закономерности. При крайне незначительной доле аномальных родников в Южном Приуралье (2,2 %) они формируют контрастно выделяющиеся урочища, образующие интерферирующие ландшафтные геопольа и выступающие в качестве надрегиональных уровней организации гидроморфных геосистем. Кроме того, ландшафтно-топологическая ординация родниковых урочищ определяется гидрохимической зональностью, которая подчиняется гидроклиматически обу-

Основные характеристики родниковых кластеров Южного Приуралья

| Показатели | Кластеры | | | | | | | |
|---|----------|-------|--------|-------|-------|-------|---------|---------|
| | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII |
| Количество родников | 18 | 52 | 123 | 114 | 540 | 200 | 5 | 1 |
| Доля от их общего числа (1053), % | 1,7 | 4,9 | 11,7 | 10,9 | 51,2 | 19,0 | 0,5 | 0,1 |
| Высота, м | 239,2 | 250,4 | 202,6 | 238,6 | 207,4 | 173,5 | 189,6 | 167,3 |
| Гидравлический тип* | 1,3 | 1,6 | 1,4 | 1,4 | 1,3 | 1,3 | 1,0 | 2,0 |
| Дебит, л/с | 13,3 | 5,3 | 0,3 | 2,0 | 0,3 | 0,4 | 0,4 | 0,1 |
| Минерализация, мг/л | 420,0 | 549,0 | 1017,9 | 399,7 | 369,0 | 726,9 | 12830,0 | 90100,0 |
| Содержание компонентов, мг-экв/% | | | | | | | | |
| Na | 51,1 | 40,8 | 97,5 | 38,1 | 41,9 | 148,4 | 11196,4 | 31158,0 |
| Ca | 54,2 | 81,5 | 129,4 | 52,0 | 53,6 | 64,0 | 463,8 | 1790,0 |
| Mg | 24,9 | 30,9 | 49,9 | 26,2 | 25,8 | 35,9 | 96,5 | 448,0 |
| Cl | 46,5 | 24,5 | 48,8 | 15,3 | 16,1 | 163,7 | 16235,3 | 52376,0 |
| SO ₄ | 43,4 | 121,4 | 431,8 | 46,9 | 42,4 | 111,1 | 2091,0 | 82,0 |
| HCO ₃ | 281,2 | 297,2 | 302,7 | 283,4 | 297,3 | 318,7 | 164,5 | 140,0 |
| Содержание гипотетических солей, мг-экв/% | | | | | | | | |
| Ca(HCO ₃) ₂ | 54,2 | 58,7 | 102,1 | 51,6 | 54,6 | 60,5 | 145,3 | 140,0 |
| Mg(HCO ₃) ₂ | 24,9 | 30,9 | 49,9 | 26,0 | 25,8 | 35,9 | 120,4 | 448,0 |
| NaHCO ₃ | 51,4 | 40,0 | 97,5 | 38,1 | 41,8 | 148,4 | 11193,4 | 31158,0 |
| CaSO ₄ | 43,4 | 121,4 | 431,8 | 46,5 | 42,2 | 111,1 | 2090,0 | 82,0 |
| NaCl | 46,5 | 24,5 | 48,8 | 15,3 | 16,0 | 163,7 | 16228,2 | 52376,0 |

* Гидравлический тип (Т) — соотношение числа восходящих и нисходящих родников, вычисляемое по формуле корреляции непараметрических данных: $T = \frac{\Sigma Tв(2) + Tн(1)}{n}$, где $\Sigma Tв(2)$ — сумма восходящих родников, условно принимаемых за 2; $\Sigma Tн(1)$ — сумма нисходящих родников, условно принимаемых за 1; n — кол-во родников.

словленному распределению классов подземных вод. Формирование естественных выходов подземных вод, аномальных по различным параметрам, связано с проявлениями аazonальных факторов — с прорывом соляных и гипсовых диапиров (гидрохимические аномалии) или с разрывными нарушениями, секущими водообильные горизонты подземных вод (гидрологические аномалии).

Результатом кластеризации параметров родниковых вод стала разработка концепции ландшафтогенеза родниковых геосистем. При этом выявлено, что особенности территориального размещения гидрологических и гидрохимических аномалий родниковых ландшафтов обусловлены структурой природных границ и рубежей [4, 5]. Степень аномальности родниковых ландшафтов определяется близостью их расположения по отношению к природным рубежам соответствующего иерархического порядка: чем выше уровень физико-географической границы, тем ярче проявление аномальных свойств. Родниковые ландшафты, расположенные у границ района (провинции), обнаруживают существенное отклонение от типоморфных свойств, что может быть объяснено их вовлечением в граничные парадинамические геосистемы (экотоны). Подобная пространственная дифференциация особенностей родниковых ландшафтов согласовывается с одной из важных закономерностей в ландшафтоведении — отклонением ландшафтов от инварианта в зависимости от степени проявления зональности и размещения по отношению к границам физико-географического района (провинции). Ландшафтно-топологическая ординация родниковых урочищ определяется климатической зональностью и проявляется через широтное изменение гидрохимических свойств родниковых вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Гидрогеология СССР** (Оренбургская область) / Под ред. И. И. Токмачева. — М.: Недра, 1972. — 281 с.
2. **Зинченко Л. Е.** Подземные воды // Географический атлас Оренбургской области. — М.: Дик, 1999. — С. 16–17.
3. **Севастьянов О. М., Севастьянова С. К.** Подземные воды кунгурских отложений Оренбургского Приуралья // Вопросы геологии Южного Урала и Поволжья. — 1970. — Вып. 7. — С. 20–33.

4. **Сивохиц Ж. Т., Петрищев В. П., Чибилёв А. А.** Естественные выходы подземных вод Южного Предуралья: связь гидрогеохимической дифференциации с типами местности // Изв. РГО. — 2003. — Т. 135, вып. 3. — С. 42–50.
5. **Сивохиц Ж. Т., Калмыкова О. Г.** Краткий анализ пространственной организации ручьевых комплексов низкогорных ландшафтов Оренбургской области // Вестн. Воронеж. ун-та. Сер. География, геоэкология. — 2008. — № 1. — С. 16–20.

Поступила в редакцию 25 октября 2010 г.
