УДК 556

В.А.КИРЮХИН
О.Н.ДЕ БЕРМУДЕС
Санкт-Петербургский горный институт

ГИДРОГЕОЛОГИЯ КОЛУМБИИ

Впервые систематизированы и проанализированы гидрогеологические материалы, собранные в Колумбии. Выявлены закономерности распространения и формирования подземных вод. Обоснованы гидрогеологическое районирование страны, стратификация разреза и зональность подземных вод.

The materials on the hydrogeology of Columbia are systematized and analysed for the first time. The conformities of spreading and formation of ground waters are revealed. Hydrogeological regioning of the country, hydrogeological stratification and zonality of ground waters are substantnated.

Разрозненные локальные изыскания, которые ранее проводились на территории Колумбии – сложной и интереснейшей в гидрогеологическом отношении страны, не были ранее обобщены и систематизированы. Выполнение исследований под руководством В.А.Кирюхина позволило устранить этот пробел. На основе проведенных исследований успешно защищена кандидатская диссертация [1], подготовлен ряд публикаций по вопросам региональной гидрогеологии Колумбии.

Следует отметить, что работа по гидрогеологии Колумбии является логическим продолжением исследований кафедры гидрогеологии и инженерной геологии за последние 15 лет. На основе этих исследований выявлены закономерности континентов Зарубежной Европы и Северной Америки, дна мирового океана и отдельных структур (вулканогенов и складчатых областей, древних и молодых плит) и, наконец, всего земного шара [2, 3].

Изучение гидрогеологии Колумбии дало возможность оценить условия формирования подземных вод в специфической обстановке – сочетание древнейших платформ и альпийских складчатых сооружений, горный рельеф и экваториальный климат, отсутствие соленосных и карбонатных пород, влияние древнего и современного морского седиментагенеза, современного вулканизма, неотектоники и активной сейсмичности – все это позволяет рассматривать изучаемую территорию как своеобразный полигон, характеризующийся весьма специфической гидрогеологической обстановкой.

Гидрогеологическое районирование оценивает пространственное распределение емкостных запасов подземных вод. Интересно отметить, что с востока на запад структуры молодеют. Если на востоке Колумбии находятся древние платформы (Южно-Американская), то в центре и на западе воздымается горно-складчатый пояс Колумбийских Кордильер, а на западной и северной окраинах страны расположены прибрежные морские равнины. В соответствии с принципами структурно-гидрогеологического районирования в области развития древней платформы были выделены и охарактеризованы Оринокский и Амазонский артезианский бассейны (АБ) платформенного типа. В пределах горно-складчатого пояса Колумбийских Кордильер удалось выделить разнообразные типы гидрогеологических массивов (ГМ), вулканогенных бассейнов (ВБ) и артезианские бассейны межгорного и предгорного типов. На прибрежных равнинах оказались расположены артезианские бассейны семиморинного типа.

Высотная поясность контролирует распределение природных элементов водного и

теплового баланса. Горно-складчатый пояс Колумбийских Кордильер отличается обилием атмосферных осадков, поскольку на него приносятся водно-воздушные массы как с Тихого, так и с Атлантического океанов. Обычно среднегодовой уровень атмосферных осадков составляет 2000 мм. В их распределении наблюдается несколько закономерностей. Со стороны Тихого океана осадков выпадает больше (до 4000-12000 мм/год), а со стороны Атлантического океана (до 3000 мм/год). Сокращение количества осадков связано с уменьшением абсолютных отметок местности. Горные системы представляют собой препятствие для проникновения воздушных масс. Поэтому на горных (наветренных) склонах выпадает на 20-35 % осадков больше, чем на внутренних (подветренных) склонах. Все сказанное отражается на распространении поверхностного стока. Так, для бассейна рек Тихого океана модуль поверхностного стока равен 90,24 л/с·км^2, а для бассейна Карибского моря – 41,45 л/с·км^2. Следует отметить, что атмосферное питание составляет 30-40 % в общем балансе. Экваториальный климат Колумбии характеризуется большой влажностью и значительными перепадами температуры воздуха. Если в равнинных областях среднегодовая температура воздуха колеблется в пределах 23-29 °С, то с повышением меток она уменьшается 0,6-0,7 °С на 100 м высоты. Поэтому на отметке 4700 м проходит изотерма в 0 °С и возможно распространение многолетней мерзлоты. Важно отметить, что активному росту биоты и интенсивному выветриванию пород способствует мощный поток радиогенного тепла: 120-165 Ккал/см^2 в год.

Гидрогеодинамические особенности. В Колумбийских Кордильерах выделяются три типа подземного стока: приповерхностный (горная верховодка), трещинно-грунтовый и трещинно-напорный. В условиях Колумбии формирование подземного стока имеет много специфических особенностей. Приповерхностный сток характеризуется цикличностью, обусловленной двумя сезонами дождей. Источники верховодки начинаются примерно с высоты 4300 м. Трещинно-грунтовый сток динамичен, но функционирует с некоторыми перепадами в течение всего года. Его источники образуют истоки постоянно действующих водотоков. Расходы источников возрастают с понижением рельефа от долей до нескольких десятков литров в секунду. Трещинно-грунтовые воды приурочены к зоне выветривания коренных пород. Степень их обводненности зависит от состава и возраста пород. По данным проходки тоннелей на Восточных и Западных Кордильерах (интервал глубин 45-100 м) удельный приток составляет: в песчаниках верхнего мела 0,2, в сланцах нижнего мела 0,05, а в метаморфических породах палеозоя 0,01 л/с на 1 м проходки. Наибольший интерес в коренных породах представляют зоны тектонических нарушений, с которыми связан выход термальных и минеральных вод. Интересные данные о распределении элементов водного баланса получены по наблюдениям в бассейнах с водосборной площадью 200-300 км^2 (табл.1).

Такие водотоки являются наиболее репрезентативными для решения указанных задач. Из приведенных данных следует, что 25-40 % атмосферных осадков тратится на образование подземного стока.

На территории Колумбии выделяются три типа АБ: платформенный, семимаринный (прибрежно-шельфовый) и межгорный. Каждому из них свойственны свои специфические гидрогеодинамические особенности. В АБ платформенного типа, сложенных терригенными и карбонатными породами палеозоя, верхнего мела и кайнозоя, мощность достигает до 2-3 км. В этих бассейнах сформировался инфильтрационный режим, который обеспечил вытеснение седиментационных вод морского генезиса. В предгорьях Кордильер мощность осадочных пород возрастает до 10-15 км.

Межгорные АБ располагаются между горными сооружениями Кордильер. В пределах Колумбии их выделяют три: Магдаленский (на востоке), Патунско-Каукийский (на западе) и Миракайбский (на севере). Чехол этих артезианских бассейнов сложен преимущественно кайнозойскими терригенными отложениями мощностью до 1-2,5 км.

Таблица 1

Характеристики элементов водного баланса водосборов

Водоток	Площадь водосбора, км^2	Осадки, мм	Суммарное испарение, мм	Речной сток		Подземный сток	
				мм	л/с·км^2	мм	л/с·км^2
Восточные Кордильеры – западный склон							
Теусака	254	1250	850	318	10,1	82	2,6
Сумапас	357	1500	650	636	20,2	214	6,8
Сейбас	220	1850	1000	715	22,7	135	4,3
Центральные Кордильеры – восточный склон							
Бачс	255	2200	800	989	31,4	411	13,0
Бланко	270	1750	750	630	20,0	370	11,7
Центральные Кордильеры – западный склон							
Пьедамо	180	1850	650	782	24,8	418	13,2
Фрайде	286	1750	950	649	20,6	151	4,8
Тапиас	264	2300	1000	702	22,3	598	19,0
Западные Кордильеры – восточный склон							
Боливар	290	2250	1050	888	28,2	312	9,9
Западные Кордильеры – западный склон							
Атрато	333	3500	1000	1442	45,8	1058	33,6

Чехол АБ подстилается верхнемеловыми морскими литифицированными песчано-глинистыми отложениями, представляющими собой верхний этаж складчатого фундамента. Водоупорные породы в пределах чехла не выражены по площади и мощности. Наблюдается широкое развитие тектонических нарушений, которое обуславливает блоковое строение артезианских структур. Производительность скважин, вскрывших песчаные отложения неоген-четвертичного возраста, составляет до 20 л/с. Водопроводимость этих пород равна 100-200 м^2/с. Расходы скважин, вскрывших верхнемеловые песчаники, достигают 40 л/с при водопроводимости 600-700 м^2/с. Тектонические нарушения, которые прослеживаются в меловых и кайнозойских отложениях, как и невыдержанность водоупоров, обеспечивают гидравлическую связь водоносных систем верхнего мела и кайнозоя.

Рассмотрим на примере Боготинского АБ особенности гидрогеодинамики межгорных бассейнов. Он лучше изучен в этом отношении, чем другие АБ, представляет собой АБ второго порядка и расположен в верхней части Магдаленского АБ. Верхний и нижний гидрогеодинамические этажи с позиций направленности движения подземных вод можно рассматривать как нисходящий (N-Q) и восходящий (K_2). За время эксплуатации верхнемелового комплекса с начала 50-х годов XX в уровень вод снизился на 20-30 м. Если в 50-е годы скважины работали на самоизливающем режиме, то теперь на откачечном режиме. Расчет моделирования эксплуатационных запасов подземных вод показывает, что в неоген-четвертичном комплексе они составляют $175 \cdot 10^4$ м^3, а в верхнемеловом – $10{,}4 \cdot 10^4$ м^3. Доля подземного стока, поступающего с горно-складчатого обрамления, составляет до 30 % в общем балансе питания Боготинского АБ.

Минеральные и термальные воды установлены в горно-складчатом поясе Кордильер. Специальных работ по разведке этих вод не проводилось, поэтому основные сведения о минеральных и термальных водах базируются на изучении их выходов на поверхность. Азотные термы по особенностям циркуляции относятся к трещинно-жильному типу и связаны с глубокими тектоническими нарушениями. По условиям формирования

химического состава азотные термы могут быть подразделены на три группы: гидрокарбонатного, сульфатного и сульфатно-хлоридного состава. К первой группе относятся источники Чоачим, Хирардот и др. Они характеризуются HCO_3-Na-Ca-составом, минерализацией 0,6-0,9 г/л, pH = 6,6, содержанием кремнезема 41-47 мг/л и температурой 33-52 °С. Циркуляция этих вод происходит в химически инертных породах – песчаниках и сланцах. Ко второй группе вод относятся источники Табио, Азуфраль и др. Они характеризуются преимущественно HCO_3-SO_4-Na-составом, минерализацией 0,9-2,6 г/л, pH = 6,9-7,5, содержанием кремнезема до 180 мг/л и температурой 41-93 °С. Обогащение терм сульфатами обязано процессам сернокислотного выщелачивания в зоне неотектонических нарушений, обогащенных сульфидной минерализацией. Воды третьей группы представлены источниками Чилес, Грантис и др. Они характеризуются SO_4-Cl-Na и Cl-SO_4-Na-составом, минерализацией 1,3-2,6 г/л, pH = 4,5-7,6, содержанием кремнезема до 114 мг/л и температурой 28-52 °С. Предполагается, что повышенные концентрации сульфатов и хлоридов в термах связано с выщелачиванием пород морского генезиса, в которых воды циркулируют. Особого упоминания заслуживает источник Тайпа (Восточные Кордильеры). Эти воды отличаются уникальными свойствами, очень редкими в природе. Они относятся к рассолам сульфатного типа с минерализацией 42 г/л и температурой 53 °С. Отмечается повышенное содержание лития, бора, тяжелых металлов и кремнезема.

В Восточных и Центральных Кордильерах распространены углекислые термы. По своим химическим особенностям эти воды делятся на три группы: воды сульфатного типа районов современного вулканизма, хлоридно-гидрокарбонатные воды районов молодого вулканизма, воды пестрого состава районов тектономагматической активизации. Все углекислые воды являются термальными, их температура 60-94 °С. Обычно они являются солоноватыми, их минерализация превышает 1-2 г/л.

Гидрогеохимические закономерности. Формирование химического состава подземных вод следует рассматривать в цепи преобразований: атмосферные осадки – зона аэрации – грунтовые воды – напорные воды. Специфика природных условий рассматриваемой территории состоит в исключительном влиянии жаркого и влажного климата, способствующему глубокому выветриванию (до латеритных почв) и интенсивной миграции минеральных веществ. Кроме того, большое влияние на гидрогеохимические процессы оказывают ландшафтно-геохимические условия. Высокогорный рельеф, межгорные впадины в сочетании с экваториальным климатом обеспечивают интенсивную водную миграцию химических веществ. Главную роль при этом играют процессы углекислотного и сернокислотного выщелачивания, сопровождающие инфильтрацию вод атмосферного происхождения. Аргументом в пользу такого предположения может служить анализ преобразования состава природных вод по ходу их движения. Так, состав атмосферных вод обычно Cl-HCO_3-Na, при минерализации 0,01-0,025 г/л (0,07 г/л встречается в районах техногенного загрязнения). При инфильтрации атмосферных вод в зону приповерхностного стока минерализация возрастает до 0,05-0,07 г/л, а состав меняется мало – HCO_3-Na-Ca. Более глубокие изменения происходят в зоне трещинно-грунтовых вод, где отчетливо прослеживается участие вмещающих пород в гидрогеохимических процессах. Так, по данным статистической обработки, средний химический состав трещинно-грунтовых вод в песчаниках мела выглядит следующим образом:

$$M_{0,1}\frac{HCO_3 50Cl39SO_4 10}{Na43Ca40Mg17}\,pH6{,}2, t^{\circ}14{,}4\ ^{\circ}C;$$

в метаморфических породах палеозоя:

$$M_{0,24}\frac{HCO_3 50SO_4 43Cl7}{Ca36Mg35Na24K5}\,pH6{,}1, t^{\circ}14{,}9\ ^{\circ}C;$$

в интрузивных породах:

$$M_{0,4}\frac{HCO_3 51SO_4 43Cl7}{Ca51Mg34Na15}\,pH6{,}5, t^{\circ}16{,}9\ ^{\circ}C.$$

Таблица 2

Гидрогеохимические зоны Боготинского АБ

Зона	Интервалы глубины, м	Минерализация, г/л	Состав вод	pH	*t*, °C	Характерные микрокомпоненты
I	0-220	0,05-0,2	HCO_3-Ca-Na	6-7	16-20	Fe, Mn
II	200-500	0,2-0,5	HCO_3-Na	7-8,5	20-30	Fe, Mn,SiO_2
III	500-2500	0,5-1,0	Cl-HCO_3-Na,	7-8	30-100	SiO_2,B, Li
IV	2500-5000	1,0-3,0	HCO_3-Cl-Na	6-7	100-220	B, Li, Cu, Zn

В трещинно-напорных водах значительно возрастает концентрация хлоридов, сульфатов и натрия при росте минерализации до 1-2 г/л, реже больше. Гидрогеохимическая зональность в осадочных бассейнах лучше всего изучена в Боготинском АБ. Средний химический состав грунтовых вод неоген-четвертичного комплекса выглядит следующим образом:

$$M_{0,2}\frac{HCO_3 93Cl7}{Na54Ca25Mg18K3}\,pH6,1,t^{\circ}18\ ^{\circ}C\,.$$

С глубиной наблюдается рост содержания гидрокарбонатов, хлоридов, повышение pH до 8-8,5, содержания кремнезема до 60 мг/л, концентрации в отдельных точках железа до 24 мг/л и марганца до 0,3 мг/л. В гидрогеохимическом разрезе Боготинского АБ можно выделить несколько гидрогеохимических зон (табл.2)

Рассмотрение вертикальной гидрогеохимической зональности позволяет сделать следующие выводы:

1) рост минерализации вод с глубиной идет весьма медленно – граница вод с минерализацией 1 г/л проходит на глубине около 2,5 км;

2) показателями глубинности вод является присутствие в них бора и лития, рост содержания хлоридов натрия, температуры и др.;

3) всплески концентраций некоторых компонентов характерны для определенных интервалов глубин (Fe, Mn, SiO_2, HCO_3, щелочные компоненты и др.).

Загрязнение подземных вод. Как это не парадоксально звучит, но во многих районах Колумбии, богатейшей водными ресурсами, «у воды живут без воды». Водоснабжение обычно базируется на поверхностных водах, но реки, например в районах р. Богота, превратились в сточные канавы. Поскольку во многих районах интенсивного сельскохозяйственного земледелия грунтовые воды не имеют защитной глинистой покрышки, то загрязнение начинает проявляться в верхней части гидросферы. В Боготинском АБ почвенные воды на многих участках оказались загрязнены тяжелыми металлами: Cu, Co, Ni, Zn, Pb, Hg, As и др. Их концентрация в 5-10 раз превышает ПДК. Широкий спектр загрязнения наблюдается в зоне грунтовых вод, залегающих до глубины 25-30 м. Это бактериальное, нефтяное, химическое и загрязнение от сельскохозяйственной, промышленной и других видов человеческой деятельности. Минерализация вод в этих местах возрастает до 1,6 г/л за счет сульфатов (более 150 мг/л), хлоридов (более 280 мг/л), нитратов (до 320 мг/л), фосфатов (более 0,4 мг/л), тяжелых металлов и других компонентов. В подземных водах, залегающих глубже 25-30 м, загрязнение заметно уменьшается. Минерализация вод не превышает 0,4-0,62 г/л, количество нитратов не превышает 20 мг/л. Наряду с техногенными загрязнениями подземных вод часто встречается и природное. Оно обычно связано с превышением ПДК по железу, марганцу, органическим соединениям и др.

Выводы

Систематическое изучение гидрогеологии Колумбии только начинается. Нами сделано полное обобщение имеющегося материала, из которого можно сделать важные выводы об особенностях гидрогеологии

этой страны, наметить основные закономерности распространения и формирования подземных вод, решить некоторые вопросы распространения, стратификации и зональности подземных вод. Перспективы освоения ресурсов подземных вод этой страны весьма велики. Эффективное решение задач по использованию пресных, минеральных и термальных подземных вод позволит решить важные социально-экономические задачи развития страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Де Бермудес О.Н.* Гидрогеологическое районирование Колумбии и формирование подземных вод верхней части бассейна реки Богота: Автореф. ... канд. геол.-мин. наук / СПГГИ. СПб, 2000.

2. *Кирюхин В.А.* Региональная гидрогеология: Учебник / В.А.Кирюхин, Н.И.Толстихин. М.: Недра, 1987.

3. *Кирюхин В.А.* Гидрогеология Северной Америки / СПГГИ. СПб, 1997.

4. *Кирюхин В.А.* Региональная гидрогеология: Практикум / В.А.Кирюхин, Н.С.Петров; СПГГИ. СПб, 2001.