

Г. А. Максимович

ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ЗОНЫ ПЛАТФОРМ

В советской литературе были попытки отнесения различных типов подземных вод к тем или иным геохимическим зонам. По Б. Л. Личкову, все холодные пресные вадозные воды приурочены к поясу выветривания. Холодные и термальные минеральные воды он делил на фреатические метаморфического пояса и ювениальные – магматического пояса (8). Ф. П. Саваренский (23) указывал такую геохимическую зональность: почвенные, болотные, верховодку и грунтовые воды он относил к зоне выщелачивания и местами зонального засоления, карстовые – к зоне выщелачивания, артезианские – к зоне выщелачивания и цементации, а жильные (трещинные) – к зоне цементации. По Н. К. Игнатовичу (5), подземные воды верхней части земной коры находятся в зоне гипергенеза, а нижней – к зоне катагенеза.

А. Е. Ферсман (28) понимал под катагенезом геохимические и минералогические процессы, возникающие на границе разнородных минеральных компонентов или обмен между разнородными твердыми оболочками. В последнее время А. И. Перельман (22) дал новое определение катагенеза. Он указал, что основным агентом катагенеза являются подземные воды, мигрирующие на сравнительно небольших расстояниях в пределах контактов пород. При миграции подземных растворов на большие расстояния, когда также происходит образование новых минеральных тел, мы имеем по А. Е. Ферсману гидрогенез.

Основываясь на том, что процессы катагенеза и гидрогенеза в понимании А. Е. Ферсмана обусловлены одним и тем же агентом – водой, А. И. Перельман предлагает оставить один термин – катагенез, расширив его толкование. Катагенез, по А. И. Перельману, это вся совокупность изменений, вызываемых подземными водами в горных породах зоны гипергенеза. В геохимии такое расширенное толкование термина катагенез быть может и удобно. В гидрогеохимии же далеко не безразлично, перемещаются подземные воды на малые или большие расстояния. Поэтому мы предлагаем различать геохимические и гидрогеохимические зоны. В геохимической зоне гипергенеза, где горные породы изменяются под влиянием катагенеза (в понимании А. И. Перельмана) автор выделяет три гидрогеохимические зоны: эпигидрогенеза, гидрогенеза и гидрогалогенеза.

К верхней зоне эпигидрогенеза относится зона инфильтрации и инфильтрации, а также верхняя часть зоны интенсивного локального подземного стока. Это зона изменения горных пород зоны выветривания и верхней части биосферы за счет факторов подземной атмо- и гидросферы.

Ниже находится зона гидрогенеза, которая включает нижнюю часть зоны интенсивного локального стока, зоны интенсивного регионального стока и замедленного водообмена подземных вод. А. Е. Ферсман (28), выделивший процесс гидрогенеза, определил его как совокупность геохимических и минералогических превращений, вызываемых проникновением гидросферы в литосферу по трещинам и жилам. Результатом гидрогенеза он считал образование карста и пещер.

Нам кажется, что в гидрогеохимии понятие гидрогенеза надо расширить, включив в него и результаты проникновения гидросферы в литосферу по порам. Основной особенностью процесса гидрогенеза, как и для карста, является выщелачивание и вынос растворимых веществ. От зоны эпигидрогенеза, где происходит интенсивное выветривание за счет кислорода подземной атмосферы и перенос продуктов выщелачивания зоны аэрации вглубь или до местных водоупоров, зона гидрогенеза отличается выносом растворенных веществ к дренам и появлением в нижней части восстановительной обстановки.

Самую нижнюю часть гидрогеохимического разреза платформ, где возникают концентрированные рассолы, мы называем зоной гидрогалогенеза. Процесс галогенеза выделил А. Е. Ферсман (28). Он происходит на земной поверхности за счет испарения и приводит к выпадению солей. В глубоких частях платформ в обстановке ничтожной подвижности возникают рассолы с минерализацией 270 и более граммов на литр (15). Этот процесс концентрирования хлоридов натрия в подземных водах мы и называем гидрогалогенезом. В этой гидрогеохимической зоне подземных рассолов, имеющей широкое развитие в СССР (2), наблюдаются в разных количествах такие элементы как Вг, J, В, Sr и другие (7).

Выщелачивание, вынос растворенных веществ и рассеяние химических элементов зоны гидрогенеза сменяются в зоне гидрогалогенеза их концентрацией.

Гидродинамические зоны пластово-поровых вод платформ

В последние два-три десятилетия советские гидрогеологи разработали учение о гидродинамических зонах подземных вод или геогидродинамических зонах. Подземные воды рассматриваются в движении, причем состав их преобладающих растворенных компонентов зависит не только от вмещающих пород, но и от подвижности вод.

Введено понятие о гидрогеологических зонах. В вертикальном разрезе они отличаются изменением степени подвижности вод и характера гидрогеологических процессов. Это в свою очередь обуславливает изменение химического состава подземных вод по вертикали. Химический состав вод в пределах одного водоносного горизонта также закономерно изменяется, что вызывает появление разнообразных гидрохимических фаций (11, 13, 14, 15). Гидрогеологические зоны характеризуются различной подвижностью подземных вод, разным химическим и газовым составом.

Б. Л. Личков (9) выделил две гидродинамические зоны, находящиеся выше и ниже поверхности эрозийного вреза, которая проходит через тальвеги речных и других долин.

Ф. А. Макаренко (10), Г. А. Максимович (12, 14, 15), Н. К. Игнатович (4), В. А. Сулин (24–26),

Г. Н. Каменский и др. (6) различают уже три гидродинамические зоны. М. А. Гатальский (1) для северо-западных районов Русской платформы и В. А. Кротова (7) для Волго-Уральской области, введя зону значительного водообмена, указывают четыре зоны. А. Н. Токарев (27), детализируя схему Н. К. Игнатова, дополняет ее зонами аэрации и колебания уровня подземных вод.

Во всех рассмотренных схемах дается весьма общая характеристика геогидродинамических зон, особенно в верхней части. Между тем именно она имеет большое значение для водоснабжения. Это побудило нас составить схему гидродинамического разреза пластово-поровых вод платформ, где отдельные зоны для сокращения обозначены буквами (табл. 1).

Таблица 1

Гидродинамические зоны пластово-поровых вод осадочного чехла платформ
(по Г. А. Максимовичу, 1961)

Гидродинамические зоны	Типы вод или зоны	Водный режим	Раскрытость, промываемость зоны	Напор	Положение относит. пэв*	Характеристика зоны	Основное направление гидрогеологического процесса
И. Инfiltrации (аэрации)	1. Зона пропитывания водами поверхностных образований (почвы, торфяников, руслового аллювия и др.)	Подвешенные и другие воды	Раскрытая, интенсивно промываемая	-	Выше	Динамические ресурсы	Активное выщелачивание и перенос растворенных веществ вглубь
	2. Зона просачивания (инfiltrации), конденсации	Периодическое просачивание воды во время дождя и таяния снега. Конденсация паров					
	2а. Подзона верховодки	Сезонные воды					
С. Интенсивного локального подземного стока	3. Зона периодического колебания уровня грунтовых и пластовых не напорных вод	Периодическое увлажнение	Раскрытая, интенсивно промываемая	-	Выше	Зона не напорных вод с колебанием уровня. Динамические ресурсы преобладают над статическими	Активное выщелачивание и вынос растворенных веществ в речные долины. В засушливых зонах засоление
	4. Грунтовые воды	По большей части постоянный водоносный горизонт					
	5. Пластовые ненапорные воды	Постоянный водоносный горизонт					
	6. Пластовые напорные эпигенетические воды	Постоянный водоносный горизонт, дающий восходящие источники по трещинам					
Р. Интенсивного регионального подземного стока	7. Пластовые напорные эпигенетические воды	Постоянный сильно проточный водоносный горизонт	Раскрытая, промываемая	+	Ниже	«	Выщелачивание и вынос растворенных веществ к региональным очагам разгрузки
З. Замедленного (затрудненного) водообмена подземных вод	8. Пластовые напорные эпигенетические воды замещающие и почти полностью заместившие сингенетические (иловые или седиментационные)	Постоянный слабо проточный водоносный горизонт	Частично раскрытая, слабо промываемая	+	Ниже	Зона не напорных глубинных вод. Статические запасы преобладают над динамическими	Медленное выщелачивание и метаморфизм состава вод. Замена минерализованных вод инfiltrировавшим и более пресными
Г. Геологического весьма затрудненного водообмена подземных вод	9. Пластовые напорные сингенетические и палеоэпигенетические	Перемещение вод постоянного водоносного горизонта в связи с эпейрогенетическими и тектоническими движениями. Подземный сток в масштабе геологического времени	Закрытая, заслоняющая	+	Ниже	Зона ничтожной подвижности напорных вод. Обычно с огромными статическими запасами	Аккумуляция солей и метаморфизм состава вод

Примечание. * пэв – поверхность эризионного вреза.

Гидродинамические зоны современного и древнего карста карбонатных отложений платформ

Наличие движущейся растворяющей воды является одним из основных условий возникновения и развития карста. Гидродинамические зоны карста своеобразны. Существует несколько схем этих зон. Так, И. Цвийич (29) еще в 1918 г. различал для приморского карста три зоны: верхнюю, где полости обычно сухи, среднюю или переходную, где в течение года в периоды выпадения осадков полости содержат воду, а в остальное время они безводны. Мощность этой зоны зависит от количества выпадающих осадков, продолжительности дождей или периода таяния снега, разработанности или объема карстовых полостей. Нижняя зона характеризуется наличием полостей постоянно заполненных водой.

Эти три зоны могут быть также названы: верхняя – зона вертикальной нисходящей циркуляции; средняя – зона колебания уровня карстовых вод (переходная) или зона сезонного водонасыщения; нижняя – зона горизонтальной циркуляции или зона постоянного насыщения.

Карстовые явления возникают в карбонатных толщах осадочного чехла платформ, испытывающих колебательные (эпейрогенические) движения. При поднятии карстового района воды зоны горизонтальной циркуляции по трещинам постепенно уходят вглубь. Высота зоны вертикальной нисходящей циркуляции растет, а зона горизонтальной циркуляции перемещается глубже.

Иногда, при наличии местных водоупоров, обусловленных наличием глинистых прослоев, окремнелостью известняков или другими причинами, в пределах зоны вертикальной нисходящей циркуляции на отдельных участках могут сохраниться висячие карстовые воды. Таким образом, в пределах зоны вертикальной нисходящей циркуляции на местных водоупорах иногда имеется подзона висячих карстовых вод. Как уже указывалось, часто она представляет реликт былой зоны горизонтальной циркуляции.

Карры, коррозийные карстовые воронки и другие поверхностные формы все исследователи относят к карстовым явлениям. Следовательно, гидродинамическую схему мы должны дополнить зоной поверхностной циркуляции, воды которой образуют эти формы.

Все это ненапорные воды.

Исследования в СССР показали, что при наличии магистральных транзитных рек, пересекающих карстовый массив, возникают и другие зоны.

Ниже зоны горизонтальной циркуляции иногда имеются изолированные каналы с напорными водами, которые разгружаются на поверхности в виде нисходящих или восходящих источников. Иногда воды этой зоны, получившей в советской литературе название зоны сифонной циркуляции, разгружаются в подрусловые карстовые пустоты. Название зоны, не вполне удачное, возникло от сходства вертикального профиля этих вогнутых кверху каналов с перевернутым сифоном. Однако оно короче, чем «напорные воды изолированных вогнутых карстовых каналов, находящихся ниже зоны горизонтальной циркуляции». Иногда в поднимающихся районах, где воды путем расширения трещин еще не успели создать единый водоносный горизонт, вместо ненапорных вод зоны горизонтальной циркуляции могут возникнуть изолированные водотоки напорных вод.

Необходимо отметить также возможность наличия под руслами транзитных рек, там где под аллювием имеются карстующиеся горные породы, зоны подрусловой или поддолинной циркуляции.

В результате разбуривания речных долин было установлено, что многие реки в области гипсового и известнякового карста обладают подрусловыми пустотами часто с карстовым потоком. Многочисленные примеры для карста карбонатных и сульфатных отложений приведены в работах автора (17, 18).

Зоны палеокарстовых пустот были установлены бурением ниже поверхности эрозионного вреза. Возникли они в прежние геологические эпохи во время континентальных перерывов в осадконакоплении. При этом образовались поверхностные карстовые формы, а на некоторой глубине и подземные в виде расширенных трещин, каверн, разнообразных каналов и других более крупных полостей. При бурении скважин последние часто фиксируются по провалу инструмента, катастрофическому уходу бурового раствора. В месторождении Хоббз (США) из такой полости при фонтанировании нефти был даже выброшен сталактит. Поперечники встреченных скважинами полостей 3–5 и до 10 м. Обычно же они менее метра.

Изучение водоносных горизонтов палеозойских карбонатных отложений восточной части Русской платформы позволило установить для палеокарстовых пустот еще три зоны циркуляции: глубинной, глубинной замедленной, весьма слабо подвижных рассолов.

Зона глубинной циркуляции характеризуется интенсивным региональным подземным стоком ниже речных долин и подрусловых карстовых пустот. Направление стока обусловлено тектоникой карстующихся карбонатных отложений. Водовмещающими обычно являются каверны, имеющие региональное распространение. При интенсивном водообмене происходит рост каверн и других полостей и вынос растворенных веществ к региональным очагам разгрузки.

Ниже, может иметь место зона глубинной замедленной циркуляции. Она уже только частично раскрыта на выходах и слабо промывается. Происходит медленное выщелачивание карбонатов, а также метаморфизация состава вод, находящихся далеко от выходов зоны на земную поверхность. Зона глубинной замедленной циркуляции питается за счет инфильтрации пресных вод на выходах.

Наконец, в глубоких частях платформ встречаются закарстованные зоны, не имеющие выхода на земную поверхность. Воды этих древних карстовых полостей в обстановке весьма слабой подвижности засоляются, превращаются в рассолы. В палеозойских отложениях Русской платформы известны Cl–Na–Ca рассолы с минерализацией 270 и более граммов на литр.

Таковы зоны современных и древних карстовых полостей. Они могут быть сгруппированы в пять гидродинамических зон: инфлюации, интенсивного локального подземного стока, интенсивного регионального подземного стока, замедленного водообмена, геологического водообмена подземных вод. Характеристика их приведена в таблице 2.

Таблица 2

Гидродинамические зоны современного и древнего карста карбонатных отложений осадочного чехла платформ
(по Г. А. Максимовичу, 1961)

Гидродинамические зоны	Зоны карстовых вод	Водный режим	Раскрытость, проницаемость зоны	Норма	Положение относит. П.Э.В. ¹	Движение вод		Характеристика зоны	Основное направление гидрогеологического процесса			
						преобладающее направление	скорость, м/год ²					
И. Инфлюации (аэрации)	I. Поверхностной циркуляции	Сток по поверхности в карстовые понижения	Раскрытая, интенсивно промываемая	-	выше	Горизонтальное по наклону к понижениям	$n \cdot 10^7 - n \cdot 10^3$	Зона инфлюации выше уровня карстовых вод. Динамические ресурсы	Активное выщелачивание и перенос растворенных веществ в глубь массива			
	II. Вертикальной нисходящей циркуляции (инфлюации)	Периодическая инфлюация после дождей и при таянии снега		-						Вертикальное нисходящее		
	IIIa. Подзона висячих водосток	Периодические и постоянные водотоки на локальном водопоре		-							Горизонтальное	$n \cdot 10^4 - n \cdot 10^5$
С. Интенсивного локального подземного стока	III. Периодического колебания уровня карстовых вод (переходная)	Периодическое увлажнение при высоком стоянии карстовых вод	-	-	-	При низком стоянии – вертикальное, при высоком – горизонтальное	-	Зона не напорных вод с колебаниями уровня. Динамические ресурсы преобладают над статическими	Активное выщелачивание и вынос растворенных веществ в речные долины (и моря)			
	IV. Горизонтальной циркуляции	Постоянная водоносность		-						Горизонтальное	$n \cdot 10^4 - n \cdot 10^5$ (0,3 м/мин.)	
	V. Сифонной циркуляции	Постоянный водоток, дающий в долине выходящие источники		+						На водоразделах карстовых вод нисходящее в зоне дрены – восходящее	$n \cdot 10^2 - n \cdot 10^4$	Зоны напорных вод. Динамические запасы преобладают над статическими
	VI. Поддолинской (подрусловой) циркуляции магистральных рек	Постоянные водотоки под долинами, дающие восходящие источники		+						ниже	В общем горизонтальное по наклону и вертикальное в местах инфлюации и разгрузки	
Р. Интенсивного регионального подземного стока	VII. Глубинной циркуляции Зоны вод палеокарстовых пустот.	Постоянный водоносный горизонт	Раскрытая, промываемая	+	ниже	Обусловленное тектонической структурой	$n \cdot 10^0 - n \cdot 10^{-1}$	Выщелачивание и вынос растворенных веществ к региональным очагам разгрузки				
З. Замедленного (затрудненного) водообмена подземных вод	VIII. Глубинной замедленной циркуляции	Постоянный слабопроточный водоносный горизонт	Частично раскрытая, слабо промываемая	+	ниже	Горизонтальное, обусловленное тектонической структурой	$n \cdot 10^{-1} - n \cdot 10^{-2}$	Зоны напорных глубинных вод. Статические запасы преобладают над динамическими	Медленное выщелачивание и метаморфизм состава вод. Замена минерализованных вод за счет инфлюации на выходах более пресных			
Г. Геологического весьма затрудненного водообмена подземных вод	IX. Древних карстовых полостей и каверн с весьма слабо подвижными рассолами	Перемещение вод постоянного водоносного горизонта в связи с эпейрогеническими движениями. Подземный сток в масштабе геологич. времени	Закрытая, засоляющаяся	+	ниже	Горизонтальное чрезвычайно медленное	$n \cdot 10^{-2} - n \cdot 10^{-3}$	Зоны ничтожной подвижности напорных вод. Обычно с огромными статическими запасами	Метаморфизм состава вод с аккумуляцией солей			

¹ поверхность эрозионного вреза

² в скобках указаны данные замеров

Обобщенный гидрогеохимический разрез осадочного чехла платформ

Распределение гидродинамических зон пластово-поровых вод и вод карбонатного карста осадочного чехла платформ по гидрогеохимическим зонам показано в таблице 3. Схема эта местами несколько условна. Мы уже указывали, что между пластово-поровыми водами зон I–6 и зонами I–VI карстовых вод гидродинамических зон И и С нет соответствия. Это наиболее ярко выражено для зон 5 и V. К первой относятся пластовые ненапорные воды, а ко второй напорные воды изолированных водотоков. Зона VII глубинной циркуляции карстовых вод не всегда приурочена только к палеокарстовым пустотам. Тут могут быть воды каверн, растущих в настоящее время за счет выщелачивания. Однако основное – соотношение гидрогеохимических и гидродинамических зон осадочного чехла платформ – в таблице 3 показано правильно. Поэтому мы и назвали ее обобщенным разрезом платформ.

Многообразие обстановок за счет различия геологической истории, рельефа, климата и многих других факторов обуславливает для отдельных участков земной коры не только различное количество гидрогеохимических и гидродинамических зон, но и различные их комбинации. Для карстовых вод это нами уже было показано (16, 19, 20, 21).

Палеокарстовые пустоты также развиты не повсеместно. Там же, где они имеются, может быть одна VII зона, две или все три (табл. 3). Зона гидрогалогенеза может отсутствовать или будет представлена одной (VIII) или двумя (VIII, IX) зонами палеокарстовых пустот.

Обобщенный гидрогеохимический и гидродинамический разрез платформ
(по Г. А. Максимовичу, 1961)

Геохимический разрез			Гидродинамические зоны	Пластово-поровые воды	Зоны карстовых вод	Основное направление гидрогеологического процесса
зона и процесс	Гидрогеохимические зоны	обстановка				
1	2	3	4	5	6	7
ЗОНА ГИПЕРГЕНЕЗА-КАТАГЕНЕЗА	ЭПИГИДРОГЕНЕЗА (подземного интенсивного выветривания)	ОКИСЛИТЕЛЬНАЯ	И. Инфильтрации и инфлюации (аэрации)	1. Зона пропитывания водами поверхностных образований (почв, торфяников, руслового аллювия и др.) 2. Зона просачивания (инфильтрации), конденсации 2а. Подзона верховодки	I. Поверхностной циркуляции II. Вертикальной нисходящей циркуляции IIIа. Подзона висячих водотоков	Активное подземное выветривание за счет окисления, выщелачивания и переноса растворенных веществ вглубь
			С. Интенсивного локального подземного стока	3. Зона периодического колебания уровня грунтовых и пластовых ненапорных вод 4. Грунтовые воды 5. Пластовые ненапорные воды 6. Пластовые напорные эпигенетические воды	III. Периодического колебания уровня карстовых вод (переходная) IV. Горизонтальной циркуляции V. Сифонной циркуляции VI. Поддолинной (подрусловой) циркуляции магистральных рек	
	ВОССТАНОВИТЕЛЬНАЯ	Р. Интенсивного регионального подземного стока	7. Пластовые напорные эпигенетические воды	Зоны вод палеокарстовых пустот VII. Глубинной циркуляции	Сравнительно интенсивное выщелачивание с выносом растворенных веществ к региональным очагам разгрузки	
		З. Замедленного (затрудненного) водообмена подземных вод	8. Пластовые напорные эпигенетические воды, замещающие и почти полностью заместившие сингенетические (иловые) или седиментационные	VIII. Глубинной замедленной циркуляции	Замедленное выщелачивание с выносом растворенных веществ к региональным очагам разгрузки	
		Г. Геологического весьма затрудненного водообмена подземных вод	9. Пластовые напорные сингенетические и палеоэпигенетические	IX. Древних карстовых полостей и каверн с весьма слабо подвижными рассолами	Засоление и метаморфизм) вод	

Подобное явление имеет место и для пластово-поровых вод. На Балтийском щите, там, где осадочный чехол представлен только четвертичными песчано-глинистыми отложениями, наблюдается только зона эпигидрогенеза и гидродинамические зоны И и С (верхняя часть). В других районах, где на кристаллическом фундаменте, кроме четвертичных отложений, имеются осадочные дочетвертичные отложения с их водоносными горизонтами, будут развиты гидродинамические зоны И, С, Р и кроме зоны эпигидрогенеза, зона гидрогенеза и т. д.

Таблица 3, как и всякое обобщение, весьма схематична. Она только в первом приближении показывает гидрогеохимический разрез осадочного чехла платформ. Многообразие обстановок континентов нашей планеты заставляет уточнить направление и интенсивность гидрогеохимических процессов по зонам. Это схематически показано на рис. 1.

Гидрогеохимический процесс представляет стадии выщелачивания или засоления. В этом проявляется единство противоположных процессов рассеяния или выноса растворенных веществ и концентрации или накопления солей в растворе. При последнем происходит смена пресных вод солоноватыми, солеными и рассолами. При выщелачивании процесс имеет противоположное направление. Эти стадии выражаются гидрохимическими формациями и фациями (15).

По зонам мы имеем разные направления и стадии единого гидрогеохимического процесса.

В зоне эпигидрогенеза в зависимости от географической зоны происходит выщелачивание или засоление. Выщелачивание наиболее интенсивно в тропической зоне и субтропиках, менее энергично протекает в тундровой зоне и наименьшее

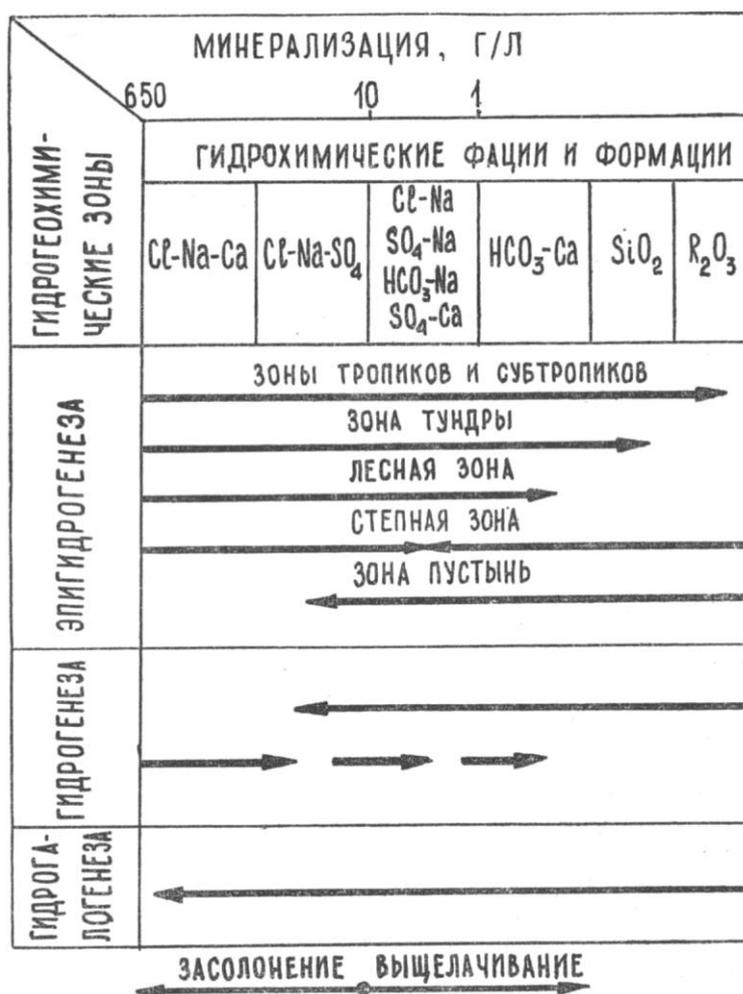


Рис. 1. Схема направления и интенсивности гидрогеохимических процессов по зонам.

в лесной зоне. В пустынной зоне наблюдается противоположный процесс засоления или эпигидрогалогенеза. Он менее интенсивен в степной зоне.

Степная зона, с ее сухими степями, степями и переходными лесостепями и полупустынями, характеризуется двумя противоположными гидрогеохимическими процессами. Это области засоления и слабого выщелачивания (рис. 1).

В зоне гидрогенеза помимо находящегося в разных стадиях выщелачивания, при замедлении движения подземных вод вследствие изменения климатических условий или тектонических движений, может происходить и засоление.

В зоне гидрогалогенеза в результате концентрации возникают соленые воды и рассолы. Это типичная зона засоления. В результате добычи нефти, сопровождаемого законтурным заводнением, рассолы приходят в движение, опресняются. Еще больше роль деятельности человека в двух верхних гидрогеохимических зонах.

О количественной характеристике гидрогеохимических зон

На различных территориях гидрогеохимические зоны осадочного чехла платформ имеют разную мощность. Для количественной характеристики можно пользоваться градиентом минерализации или гидрохимической ступенью, показателями подземной химической денудации и другими.

Градиент минерализации – это разность минерализации вод в двух точках гидрохимического разреза, отнесенная к длине интервала. Выражается он мг и г на 100 м. Обратной величиной является гидрохимическая ступень. Это интервал геологического разреза в метрах, на протяжении которого происходит увеличение минерализации воды на 1 г/л (3).

Изучение локальных платформенных структур Пермского Прикамья, проведенное Лабораторией геологии Пермского университета показало, что в зоне эпигидрогенеза в центральных частях положительных структур градиент минерализации увеличивается с глубиной быстрее, чем на крыльях или за их пределами. Гидрохимическая ступень в СССР изменяется в широких пределах. Наименьшие величины наблюдаются в артезианских бассейнах Восточной Сибири и Европейской части СССР. В Западносибирском бассейне гидрохимическая ступень доходит до 100 м и 1 г/л, а в Колпашово 818 м на 1 г/л. Максимальная величина гидрохимической ступени установлена в Прибайкальском артезианском бассейне Восточной Сибири, где она составляет 1384–2560 м на 1 г/л (3). Необходим подсчет градиентов минерализации и гидрохимической ступени для каждой гидрогеохимической зоны отдельно. В последнем случае, судя по минерализации артезианских вод

0,5 г/л на глубине 1280 м и 1,3 г/л на глубине 1800 м, мы имеем дело с зонами эпигидрогенеза и гидрогенеза.

В карстовых районах градиент минерализации иногда называют градиентом выщелачивания. Интересный подсчет градиента минерализации произвели С. В. Альбов и В. Н. Дублянский для карстовых вод Ай-Петринского массива. По данным неопубликованной работы¹ градиент минерализации до глубины 100 м составляет 127 мг/100 м. Это верхняя часть зоны эпигидрогенеза. В нижней части он составляет только 8 мг/100 м.

Необходимо и в других районах вычислять эти показатели.

Показатели подземной химической денудации характеризуют верхние две гидрогеохимические зоны. Это подземная химическая денудация. Она представляет объем вынесенных подземными водами за год растворенных веществ, отнесенный к дренируемой площади и выражается в микронах. По подсчетам Г. К. Михайлова, для Среднего Прикамья она составляет 6–42 микрона. При этом большие цифры 18, 23, 29, 32, 33, 35 и 42 характеризуют локальные платформенные структуры, а участки с моноклинальным залеганием и прогибы отличаются подземной химической денудацией в 6, 7, 9, 11 микронов в год.

В карстовых районах подземная химическая денудация или сокращенно карстовая денудация – это слой карстующихся пород, который выносится в год с площади карстующегося массива. Он выражается в микронах. Определяют карстовую денудацию делением выносимого родниками объема растворенных веществ на площадь. Особенность ее заключается в том, что большая часть выносимого вещества обусловлена ростом подземных пустот, а не понижением поверхности карстового массива.

Карстовая денудация Горного Крыма при выносе в год 17300 м³ с площади 490 км² будет 35,3 микрона. Для участка Девий – Ветлан Ксенофоновско-Ныробского карстового района Пермской области при площади 172 км² она будет 33,4 микрона. Денудация для одного из участков карбонатного карста Уфимского вала площадью в 336 км² составляет 12,7 микрона, а для участка гипсового карста Кишертско-Суксунского района площадью 60 км² – 117 микронов (20).

Необходимо накопление данных о карстовой денудации по другим районам СССР.

Скорость развития карста. Гидрогеологические и гидрохимические исследования позволяют, кроме карстовой денудации, подсчитать скорость развития или активность карста. По предложению Н. В. Родионова активность карстового процесса можно выражать количественно – отношением (в процентах) объема растворенной породы, выносимой подземными водами из какого-либо карстового массива за определенный отрезок времени и общему объему карстующихся пород. Это отношение он назвал степенью или показателем активности карстового процесса.

Показатель современной активности карста Н. В. Родионов выражает формулой:

$$A = \frac{v}{V} \cdot 100$$

где v – объем растворенной породы, выносимой подземными водами из карстового массива;

V – общий объем карстующих пород.

Н. В. Родионов, а за ним и другие исследователи, этот показатель подсчитывают за тысячелетие.

По величине активности карста (в процентах за тысячелетие) карстовые районы автор делит на следующие классы:

Класс активности карста	Показатель современной активности карста
1-й – чрезвычайная	>10
2-й – очень большая	10–1
3-й – большая	1–0,1
4-й значительная	0,1–0,01
5-й – малая	0,01–0,001
6-й – очень малая	0,001–0,0001
7-й – незначительная	<0,0001

Приведем опубликованные данные о численных величинах показателя активности карста как для платформ, так и складчатых областей Кавказа и Крыма (в процентах за тысячелетие):

Карст карбонатных отложений	
Кавказ, Сочинский район	0,49
Крым, Чатырдаг	0,15–0,20
Горный Крым	0,8
Уфимский вал	0,016
Район Балтийского моря	0,002
Средняя Азия, Алтайский хребет, полупустынный район	0,0001
Карст мела	
Бассейн р. Северный Донец, мело-мергельные отложения	0,27
Карст гипса	
Башкирская АССР	1,65
Кишертско-Суксунский район, Пермская область	0,8

¹ Работа С. В. Альбова и В. Н. Дублянского публикуется в настоящем сборнике.

Для карста соли эти показатели вероятно еще больше (20). Показателем подземной химической денудации можно пользоваться для характеристики относительной продолжительности пребывания отдельных участков зоны эпигидрогенеза в условиях интенсивного локального подземного стока (гидродинамическая зона С). Он представляет вес растворенных веществ в г, выносимых в секунду подземными водами с квадратного километра водосборной площади. По подсчетам Г. К. Михайлова, для рассмотренных уже локальных платформенных структур Пермского Прикамья он составляет для положительных хорошо промывающихся структур: 1,6; 1,9; 2,5; 2,7; 2,8; 2,9; 3,0; 3,6 г/сек. км², а для участков с моноклиналильным залеганием и прогибов: 0,4; 0,7; 0,8; 0,8; 1,0 г/сек. км². Таким образом, в пределах зоны эпигидрогенеза в различных структурных условиях наблюдается различная величина этого показателя. Показатель подземного химического стока изменяется по площади эпигидрогенеза. Для более древних, хорошо промытых структур он меньше, чем для сравнительно молодых промывающихся и непромытых.

* * *

Необходимо изучение гидрогеохимических зон трещинных вод.

В пределах зоны эпигидрогенеза для пластово-поровых и карстовых вод необходим подсчет градиента минерализации, гидрохимической ступени, показателя подземного химического стока и других количественных показателей для разных климатических природных зон.

Разработка учения о гидрогеохимических зонах – задача ближайшего будущего.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гатальский М. А. Подземные воды и газы палеозоя северной половины Русской платформы. Тр. Гостоптехиздат, 1954.
2. Гидрохимическая карта СССР (подземные воды). М 1:5 000 000, Госгеолтехиздат, М., 1958.
3. Гуревич М. С., Зайцев И. К., Толстухин Н. И. Региональные гидрохимические закономерности артезианских бассейнов СССР. Тр. Лаб. гидрогеол. пробл., т. 16, АН СССР, М., 1958.
4. Игнатович Н. К. О региональных гидрогеологических закономерностях в связи с оценкой условий нефтеносности. Сов. геология № 6, 1945.
5. Игнатович Н. К. Зональность формирования и деятельности подземных вод в связи с развитием геоструктуры. Вопросы гидрогеологии и инж. геологии. Сб. 13, М., 1950.
6. Каменский Г. Н. Толстухина М. М., Толстухин Н. И. Гидрогеология СССР. Госгеолтехиздат, М., 1959.
7. Кротова В. А. Гидрогеология. Волго-Уральская нефтеносная область. Тр. ВНИГРИ, вып. 94, Л., 1956.
8. Личков Б. Л. Материалы к вопросу о классификации подземных вод. Геологический комитет. Материалы по общей и прикладной геологии, вып. 98, Л., 1928.
9. Личков Б. Л. Основные черты классификации подземных вод. Иссл. подз. вод СССР, в. 3, 1933.
10. Макаренко Ф. А. Труды Сочинской бальнеологической экспедиции Института геол. наук СССР, т. III, 1937–1939.
11. Максимович Г. А. Гидрохимические фации поверхностных геосфер. ДАН СССР, т. 39, № 8, 1943.
12. Максимович Г. А. О скорости миграции воды на Земле. Природа № 2, 1943.
13. Максимович Г. А. К характеристике гидрохимических фаций пластовых вод стратисферы. ДАН СССР, т. 45, № 6, 1944.
14. Максимович Г. А. Зональность почвенных, грунтовых, речных и озерных вод и гидродинамические зоны. ДАН СССР, т. 58, № 5, 1947.
15. Максимович Г. А. Химическая география вод суши. Географиз, М., 1955.
16. Максимович Г. А. Основные типы гидродинамических профилей областей карста карбонатных и сульфатных отложений. ДАН СССР, т. 112, № 3, 1957.
17. Максимович Г. А. Подрусловые пустоты и вопросы корреляции террас и горизонтальных карстовых пещер. Ученые записки Пермского университета, т. XI, вып. 2, 1957.
18. Максимович Г. А. Корреляция речных террас и горизонтальных карстовых пещер. Труды Комиссии по изучению четвертичного периода АН СССР, т. XIII, 1957.
19. Максимович Г. А. Гидродинамические зоны карстовых вод и основные типы подземного стока. Специальные вопросы карстоведения. АН СССР, М., 1962.
20. Максимович Г. А. Основы карстоведения, т. 1, Пермь, 1963.
21. Максимович Г. А. и Хейнсалу Ю. И. Новый тип гидродинамического профиля в Эстонской карстовой области. Известия АН Эстонской ССР, сер. технич. и физико-математич. наук, т. 8, № 3, 1959.
22. Перельман А. И. Катагенез. Изв. АН СССР, сер. геологическая, № 8, 1959.
23. Саваренский Ф. П. Классификация подземных вод. Избранные сочинения. Изд. АН СССР, 1950.
24. Сулин В. А. Условия образования и основы классификации природных вод и в частности вод нефтяных месторождений. Изв. АН СССР, отд. тех. наук № 9, 1945.
25. Сулин В. А. Воды нефтяных месторождений в системе природных вод. Гостоптехиздат, 1946.
26. Сулин В. А. Условия образования, основы классификации и состав природных вод, ч. 1, Изд. АН СССР, М., 1948.
27. Токарев А. Н. Радиогидрогеология, стр. 28–32, Госгеолтехиздат, М., 1956.
28. Ферсман А. Е. Геохимия, т. II, стр. 286–287, ОНТИ, Л., 1934.
29. Cvjić J. Hydrographie souterraine et évolution morphologique du Karst. Trav. Inst. de G. alpine. VI, 4, Grenoble, 1918.

Пермский университет

Г. А. Максимович

ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКИЕ ЗОНЫ ПЛАТФОРМ

В советской литературе были попытки отнесения различных типов подземных вод к тем или иным геохимическим зонам. По Б. Л. Личкову, все холодные пресные вадозные воды приурочены к поясу выветривания. Холодные и термальные минеральные воды он делил на фреатические метаморфического пояса и ювениальные — магматического пояса (8). Ф. П. Саваренский (23) указывал такую геохимическую зональность: почвенные, болотные, верховодку и грунтовые воды он относил к зоне выщелачивания и местами зонального засоления, карстовые — к зоне выщелачивания, артезианские — к зоне выщелачивания и цементации, а жильные (трещинные) — к зоне цементации. По Н. К. Игнатовичу (5), подземные воды верхней части земной коры находятся в зоне гипергенеза, а нижней — к зоне катагенеза.

А. Е. Ферсман (28) понимал под катагенезом геохимические и минералогические процессы, возникающие на границе разнородных минеральных компонентов или обмен между разнородными твердыми оболочками. В последнее время А. И. Перельман (22) дал новое определение катагенеза. Он указал, что основным агентом катагенеза являются подземные воды, мигрирующие на сравнительно небольших расстояниях в пределах контактов пород. При миграции подземных растворов на большие расстояния, когда также происходит образование новых минеральных тел, мы имеем по А. Е. Ферсману гидрогенез.

Основываясь на том, что процессы катагенеза и гидрогенеза в понимании А. Е. Ферсмана обусловлены одним и тем же агентом — водой, А. И. Перельман предлагает оставить

один термин — катагенез, расширив его толкование. Катагенез, по А. И. Перельману, это вся совокупность изменений, вызываемых подземными водами в горных породах зоны гипергенеза. В геохимии такое расширенное толкование термина катагенез быть может и удобно. В гидрогеохимии же далеко не безразлично, перемещаются подземные воды на малые или большие расстояния. Поэтому мы предлагаем различать геохимические и гидрогеохимические зоны. В геохимической зоне гипергенеза, где горные породы изменяются под влиянием катагенеза (в понимании А. И. Перельмана) автор выделяет три гидрогеохимические зоны: эпигидрогенеза, гидрогенеза и гидрогалогенеза.

К верхней зоне эпигидрогенеза относится зона инфильтрации и инфильтрации, а также верхняя часть зоны интенсивного локального подземного стока. Это зона изменения горных пород зоны выветривания и верхней части биосферы за счет факторов подземной атмо- и гидросферы.

Ниже находится зона гидрогенеза, которая включает нижнюю часть зоны интенсивного локального стока, зоны интенсивного регионального стока и замедленного водообмена подземных вод. А. Е. Ферсман (28), выделивший процесс гидрогенеза, определил его как совокупность геохимических и минералогических превращений, вызываемых проникновением гидросферы в литосферу по трещинам и жилам. Результатом гидрогенеза он считал образование карста и пещер.

Нам кажется, что в гидрогеохимии понятие гидрогенеза надо расширить, включив в него и результаты проникновения гидросферы в литосферу по порам. Основной особенностью процесса гидрогенеза, как и для карста, является выщелачивание и вынос растворимых веществ. От зоны эпигидрогенеза, где происходит интенсивное выветривание за счет кислорода подземной атмосферы и перенос продуктов выщелачивания зоны аэрации вглубь или до местных водоупоров, зона гидрогенеза отличается выносом растворенных веществ к дренам и появлением в нижней части восстановительной обстановки.

Самую нижнюю часть гидрогеохимического разреза платформ, где возникают концентрированные рассолы, мы называем зоной гидрогалогенеза. Процесс галогенеза выделил А. Е. Ферсман (28). Он происходит на земной поверхности за счет испарения и приводит к выпадению солей. В глубоких частях платформ в обстановке ничтожной подвижности возникают рассолы с минерализацией 270 и более граммов на литр (15). Этот процесс концентрирования хло-

ридов натрия в подземных водах мы и называем гидрогалогенезом. В этой гидрогеохимической зоне подземных рассолов, имеющей широкое развитие в СССР (2), наблюдаются в разных количествах такие элементы как Br, J, B, Sr и другие (7).

Выщелачивание, вынос растворенных веществ и рассеяние химических элементов зоны гидрогенеза сменяются в зоне гидрогалогенеза их концентрацией.

Гидродинамические зоны пластово-поровых вод платформ

В последние два-три десятилетия советские гидрогеологи разработали учение о гидродинамических зонах подземных вод или геогидродинамических зонах. Подземные воды рассматриваются в движении, причем состав их преобладающих растворенных компонентов зависит не только от вмещающих пород, но и от подвижности вод.

Введено понятие о гидрогеологических зонах. В вертикальном разрезе они отличаются изменением степени подвижности вод и характера гидрогеологических процессов. Это в свою очередь обуславливает изменение химического состава подземных вод по вертикали. Химический состав вод в пределах одного водоносного горизонта также закономерно изменяется, что вызывает появление разнообразных гидрохимических фаций (11, 13, 14, 15). Гидрогеологические зоны характеризуются различной подвижностью подземных вод, разным химическим и газовым составом.

Б. Л. Личков (9) выделил две гидродинамические зоны, находящиеся выше и ниже поверхности эрозионного вреза, которая проходит через тальвеги речных и других долин.

Ф. А. Макаренко (10), Г. А. Максимович (12, 14, 15), Н. К. Игнатович (4), В. А. Сулин (24—26), Г. Н. Каменский и др. (6) различают уже три гидродинамические зоны. М. А. Гатальский (1) для северо-западных районов Русской платформы и В. А. Кротова (7) для Волго-Уральской области, введя зону значительного водообмена, указывают четыре зоны. А. Н. Токарев (27), детализируя схему Н. К. Игнатовича, дополняет ее зонами аэрации и колебания уровня подземных вод.

Во всех рассмотренных схемах дается весьма общая характеристика геогидродинамических зон, особенно в верхней части. Между тем именно она имеет большое значение для водоснабжения. Это побудило нас составить схему гидродинамического разреза пластово-поровых вод платформ, где отдельные зоны для сокращения обозначены буквами (табл. 1).

Гидродинамические зоны пластово-
(по Г. А. Мак)

Гидродинамические зоны	Типы вод или зоны	Водный режим
И. Инфильтрации (аэрации)	1. Зона пропитывания водами поверхностных образований (почвы, торфяников, руслового аллювия и др.)	Подвешенные и другие воды
	2. Зона просачивания (инфильтрации), конденсации	Периодическое просачивание воды во время дождя и таяния снега. Конденсация паров
	2а. Подзона верховодки	Сезонные воды
С. Интенсивного локального подземного стока	3. Зона периодического колебания уровня грунтовых и пластовых ненапорных вод	Периодическое увлажнение
	4. Грунтовые воды	По большей части постоянный водоносный горизонт
	5. Пластовые ненапорные воды	Постоянный водоносный горизонт
	6. Пластовые напорные эпигенетические воды	Постоянный водоносный горизонт, дающий восходящие источники по трещинам
Р. Интенсивного регионального подземного стока	7. Пластовые напорные эпигенетические воды	Постоянный сильно проточный водоносный горизонт
З. Замедленного (затрудненного) водообмена подземных вод	8. Пластовые напорные эпигенетические воды замещающие и почти полностью заместившие сингенетические (иловые или седиментационные)	Постоянный слабо проточный водоносный горизонт
Г. Геологического весьма затрудненного водообмена подземных вод	9. Пластовые напорные сингенетические и палеоэпигенетические	Перемещение вод постоянного водоносного горизонта в связи с эпигенетическими и тектоническими движениями. Подземный сток в масштабе геологического времени

Примечание. * пэв — поверхность эризионного вреза.

поровых вод осадочного чехла платформ
симвичу, 1961)

Таблица 1

Раскрытость, промываемость зоны	Напор	Положение относительно сит. пэв*	Характеристика зоны	Основное направление гидрогеологического процесса
Раскрытая, интенсивно промываемая	—	Выше	Зона инфильтрации выше уровня грунтовых вод Динамические ресурсы	Активное выщелачивание и перенос растворенных веществ вглубь
Раскрытая, интенсивно промываемая	—	Выше	Зона ненапорных вод с колебанием уровня. Динамические ресурсы преобладают над статическими Зоны напорных вод. Динамические запасы преобладают над статическими	Активное выщелачивание и вынос растворенных веществ в речные долины. В засушливых зонах засоление
Раскрытая, промываемая	+	Ниже	.	Выщелачивание и вынос растворенных веществ к региональным очагам разгрузки
Частично раскрытая, слабо промываемая	+	Ниже	Зона ненапорных глубинных вод. Статические запасы преобладают над динамическими	Медленное выщелачивание и метаморфизм состава вод. Замена минерализованных вод инфильтрированными более пресными
Закрытая, засоляющая	+	Ниже	Зона ничтожной подвижности напорных вод. Обычно с огромными статическими запасами	Аккумуляция солей и метаморфизм состава вод

Гидродинамические зоны современного и древнего карста карбонатных отложений платформ

Наличие движущейся растворяющей воды является одним из основных условий возникновения и развития карста. Гидродинамические зоны карста своеобразны. Существует несколько схем этих зон. Так, И. Цвийич (29) еще в 1918 г. различал для приморского карста три зоны: верхнюю, где полости обычно сухи, среднюю или переходную, где в течение года в периоды выпадения осадков полости содержат воду, а в остальное время они безводны. Мощность этой зоны зависит от количества выпадающих осадков, продолжительности дождей или периода таяния снега, разработанности или объема карстовых полостей. Нижняя зона характеризуется наличием полостей постоянно заполненных водой.

Эти три зоны могут быть также названы: верхняя — зона вертикальной нисходящей циркуляции; средняя — зона колебания уровня карстовых вод (переходная) или зона сезонного водонасыщения; нижняя — зона горизонтальной циркуляции или зона постоянного насыщения.

Карстовые явления возникают в карбонатных толщах осадочного чехла платформ, испытывающих колебательные (эпейрогенические) движения. При поднятии карстового района воды зоны горизонтальной циркуляции по трещинам постепенно уходят вглубь. Высота зоны вертикальной нисходящей циркуляции растет, а зона горизонтальной циркуляции перемещается глубже.

Иногда, при наличии местных водоупоров, обусловленных наличием глинистых прослоев, окремелостью известняков или другими причинами, в пределах зоны вертикальной нисходящей циркуляции на отдельных участках могут сохраниться висячие карстовые воды. Таким образом, в пределах зоны вертикальной нисходящей циркуляции на местных водоупорах иногда имеется подзона висячих карстовых вод. Как уже указывалось, часто она представляет реликт былой зоны горизонтальной циркуляции.

Карры, коррозионные карстовые воронки и другие поверхностные формы все исследователи относят к карстовым явлениям. Следовательно, гидродинамическую схему мы должны дополнить зоной поверхностной циркуляции, воды которой образуют эти формы.

Все это ненапорные воды.

Исследования в СССР показали, что при наличии магистральных транзитных рек, пересекающих карстовый массив, возникают и другие зоны.

Ниже зоны горизонтальной циркуляции иногда имеются изолированные каналы с напорными водами, которые разгружаются на поверхности в виде нисходящих или восходящих источников. Иногда воды этой зоны, получившей в советской литературе название зоны сифонной циркуляции, разгружаются в подрусловые карстовые пустоты. Название зоны, не вполне удачное, возникло от сходства вертикального профиля этих вогнутых кверху каналов с перевернутым сифоном. Однако оно короче, чем «напорные воды изолированных вогнутых карстовых каналов, находящихся ниже зоны горизонтальной циркуляции». Иногда в поднимающихся районах, где воды путем расширения трещин еще не успели создать единый водоносный горизонт, вместо ненапорных вод зоны горизонтальной циркуляции могут возникнуть изолированные водотоки напорных вод.

Необходимо отметить также возможность наличия под руслами транзитных рек, там где под аллювием имеются карстующиеся горные породы, зоны подрусловой или поддолинной циркуляции.

В результате разбуривания речных долин было установлено, что многие реки в области гипсового и известнякового карста обладают подрусловыми пустотами часто с карстовым потоком. Многочисленные примеры для карста карбонатных и сульфатных отложений приведены в работах автора (17, 18).

Зоны палеокарстовых пустот были установлены бурением ниже поверхности эрозионного вреза. Возникли они в прежние геологические эпохи во время континентальных перерывов в осадконакоплении. При этом образовались поверхностные карстовые формы, а на некоторой глубине и подземные в виде расширенных трещин, каверн, разнообразных каналов и других более крупных полостей. При бурении скважин последние часто фиксируются по провалу инструмента, катастрофическому уходу бурового раствора. В месторождении Хоббз (США) из такой полости при фонтанировании нефти был даже выброшен сталактит. Поперечники встреченных скважинами полостей 3—5 и до 10 м. Обычно же они менее метра.

Изучение водоносных горизонтов палеозойских карбонатных отложений восточной части Русской платформы позволило установить для палеокарстовых пустот еще три зоны циркуляции: глубинной, глубинной замедленной, весьма слабо подвижных рассолов.

Зона глубинной циркуляции характеризуется интенсивным региональным подземным стоком ниже речных долин и под-

Гидродинамические зоны современного и древнего карста
(по Г. А. Макси)

Гидродинамические зоны	Зоны карстовых вод	Водный режим	Раскрытость, промываемость зоны	Норма	Положение относит. П.Э.В.
И. Инфлюации (аэроации)	I. Поверхностной циркуляции	Сток по поверхности в карстовые понижения	Раскрытая, интенсивно промываемая	—	выше
	II. Вертикальной нисходящей циркуляции (инфлюации)	Периодическая инфлюация после дождей и при таянии снега		—	
	IIIa. Подзона висячих водостоков	Периодические и постоянные водотоки на локальном водоупоре		—	
С. Интенсивного локального подземного стока	III. Периодического колебания уровня карстовых вод (переходная)	Периодическое увлажнение при высоком стоянии карстовых вод		—	
	IV. Горизонтальной циркуляции	Постоянная водоненосность		—	
	V. Сифонной циркуляции	Постоянный водоток, дающий в долине выходящие источники		+	
	VI. Поддолинской (подрусловой) циркуляции магистральных рек	Постоянные водотоки под долинами, дающие восходящие источники		+	
Р. Интенсивного регионального подземного стока	Зоны вод палеокарстовых пустот. VII. Глубинной циркуляции	Постоянный водоненосный горизонт	Раскрытая, промываемая	+	ниже

Таблица 2

карбонатных отложений осадочного чехла платформ
мовичу, 1961)

Движение вод		Характеристика зоны	Основное направление гидрогеологическо- го процесса
преобладающее направление	скорость, м/год ²		
Горизонтальное по наклону к пониже- ниям	$n \cdot 10^7 - n \cdot 10^3$	Зона инфлюации выше уровня кар- стовых вод. Дина- мические ресурсы	Активное выщела- чивание и перенос растворенных ве- ществ в глубь мас- сива
Вертикальное ни- сходящее			
Горизонтальное	$n \cdot 10^4 - n \cdot 10^5$		
При низком стоя- нии — вертикальное, при высоком — гори- зонтальное		Зона ненапорных вод с колебаниями уровня. Динамиче- ские ресурсы преоб- ладают над стати- ческими	Активное выщела- чивание и вынос ра- створенных веществ в речные долины (и моря)
Горизонтальное	$n \cdot 10^4 - n \cdot 10^5$ (0,3 м/мин.)		
На водоразделах карстовых вод нис- ходящее в зоне дре- ны — восходящее	$n \cdot 10^2 - n \cdot 10^4$	Зоны напорных вод. Динамические запасы преобладают над статическими	
В общем горизон- тальное по наклону и вертикальное в ме- стах инфлюации и разгрузки	$n \cdot 10^2 - n \cdot 10^4$ (1—960) м/сут.)		
Обусловленное тектонической структурой	$n \cdot 10^0 -$ $- n \cdot 10^{-1}$	Выщелачивание и вынос растворенных веществ к регио- нальным очагам раз- грузки	

Гидро- намиче- ские зоны	Зоны карстовых вод	Водный режим	Раскры- тость, промывае- мость зоны	Норма	Положение относит. П.Э.В. ¹
З. Замедленного (загруженного) водообмена подземных вод	VIII. Глубинной замедленной цирку- ляции	Постоянный сла- бопроточный водо- носный горизонт	Частично раскрытая, слабо про- мываемая	+	ниже
Г. Геологического весьма затрудненного водообмена подземных вод	IX. Древних кар- стовых полостей и каверн с весьма сла- бо подвижными рас- солами	Перемещение вод постоянного водо- носного горизонта в связи с эпейрогени- ческими движения- ми. Подземный сток в масштабе геологич. времени	Закрытая, засолоняю- щаяся	+	ниже

¹ поверхность эрозионного вреза

руслowych карстовых пустот. Направление стока обусловлено тектоникой карстующихся карбонатных отложений. Водовмещающими обычно являются каверны, имеющие региональное распространение. При интенсивном водообмене происходит рост каверн и других полостей и вынос растворенных веществ к региональным очагам разгрузки.

Ниже. может иметь место зона глубинной замедленной циркуляции. Она уже только частично раскрыта на выходах и слабо промывается. Происходит медленное выщелачивание карбонатов, а также метаморфизация состава вод, находящихся далеко от выходов зоны на земную поверхность. Зона глубинной замедленной циркуляции питается за счет инфильтрации пресных вод на выходах.

Наконец, в глубоких частях платформ встречаются закарстованные зоны, не имеющие выхода на земную поверхность. Воды этих древних карстовых полостей в обстановке весьма слабой подвижности засоляются, превращаются в рассолы. В палеозойских отложениях Русской платформы известны Cl—Na—Ca рассолы с минерализацией 270 и более граммов на литр.

Продолжение таблицы 2

Движение вод		Характеристика зоны	Основное направление гидрогеологическо- го процесса
преобладающее направление	скорость, м/год ²		
Горизонтальное, обусловленное тектонической структурой	$n \cdot 10^{-1}$ — $-n \cdot 10^{-2}$	Зоны напорных глубинных вод. Статические запасы преобладают над динамическими	Медленное выщелачивание и метаморфизм состава вод. Замена минерализованных вод за счет инфлюации на выходах более пресных
Горизонтальное чрезвычайно медленное	$n \cdot 10^{-2}$ — $-n \cdot 10^{-3}$	Зоны ничтожной подвижности напорных вод. Обычно с огромными статическими запасами	Метаморфизм состава вод с аккумуляцией солей

² в скобках указаны данные замеров

Таковы зоны современных и древних карстовых полостей. Они могут быть сгруппированы в пять гидродинамических зон: инфлюации, интенсивного локального подземного стока, интенсивного регионального подземного стока, замедленного водообмена, геологического водообмена подземных вод. Характеристика их приведена в таблице 2.

Обобщенный гидрогеохимический разрез осадочного чехла платформ

Распределение гидродинамических зон пластово-поровых вод и вод карбонатного карста осадочного чехла платформ по гидрогеохимическим зонам показано в таблице 3. Схема эта местами несколько условна. Мы уже указывали, что между пластово-поровыми водами зон 1—6 и зонами I—VI карстовых вод гидродинамических зон И и С нет соответствия. Это наиболее ярко выражено для зон 5 и V. К первой относятся пластовые ненапорные воды, а ко второй напорные воды изолированных водотоков. Зона VII глубинной цирку-

Обобщенный гидрогеохимический и
(по Г. А. Макси

Геохимический разрез			Гидродинамические зоны
Геохимическая зона и процесс	Гидрогеохимические зоны	Обстановка	
ЗОНА ГИПЕРГЕНЕЗА — КАТАГЕНЕЗ	ЭПИГИДРОГЕНЕЗА (подземного интенсивного выветривания)	ОКИСЛИТЕЛЬНАЯ	И. Инfiltrации и инфлюации (аэрации)
			С. Интенсивного локального подземного стока
	ГИДРОГЕНЕЗА (выщелачивания)	ВОССТАНОВИТЕЛЬНАЯ	Р. Интенсивного регионального подземного стока
			З. Замедленного (затрудненного) водообмена подземных вод
	ГИДРОГАЛОГЕНЕЗА (засоления)		Г. Геологического весьма затрудненного водообмена подземных вод

Таблица 3

гидродинамический разрез платформ
мовичу, 1961)

Пластово-поровые воды	Зоны вод карбонатного карста	Основное направление гидрогеологического процесса
1. Зона пропитывания водами поверхностных образований (почв, торфяников, руслового аллювия и др.)	I. Поверхностной циркуляции	Активное подземное выветривание за счет окисления, выщелачивания и переноса растворенных веществ вглубь
2. Зона просачивания (инфильтрации), конденсации	II. Вертикальной нисходящей циркуляции	
2а. Подзона верховодки	IIа. Подзона висячих водотоков	
3. Зона периодического колебания уровня грунтовых и пластовых ненапорных вод	III. Периодического колебания уровня карстовых вод (переходная)	Интенсивное выщелачивание в зоне выветривания. Вынос растворенных веществ в речные долины (моря)
4. Грунтовые воды	IV. Горизонтальной циркуляции	
5. Пластовые ненапорные воды	V. Сифонной циркуляции	
6. Пластовые напорные эпигенетические воды	VI. Поддолинной (подрусловой) циркуляции магистральных рек	Сравнительное интенсивное выщелачивание с выносом растворенных веществ к региональным очагам разгрузки
7. Пластовые напорные эпигенетические воды	Зоны вод палеокарстовых пустот VII. Глубинной циркуляции	
8. Пластовые напорные эпигенетические воды, замещающие и почти полностью заместившие сингенетические (яловые или седиментационные)	VIII. Глубинной замедленной циркуляции	Замедленное выщелачивание с выносом растворенных веществ к региональным очагам разгрузки
9. Пластовые напорные сингенетические и палеоэпигенетические	IX. Древних карстовых полостей и каверн с почти неподвижными рассолами	Засоление и метаморфизм вод

ляции карстовых вод не всегда приурочена только к палеокарстовым пустотам. Тут могут быть воды каверн, растущих в настоящее время за счет выщелачивания. Однако основное — соотношение гидрогеохимических и гидродинамических зон осадочного чехла платформ — в таблице 3 показано правильно. Поэтому мы и назвали ее обобщенным разрезом платформ.

Многообразие обстановок за счет различия геологической истории, рельефа, климата и многих других факторов обуславливает для отдельных участков земной коры не только различное количество гидрогеохимических и гидродинамических зон, но и различные их комбинации. Для карстовых вод это нами уже было показано (16, 19, 20, 21).

Палеокарстовые пустоты также развиты не повсеместно. Там же, где они имеются, может быть одна VII зона, две или все три (табл. 3). Зона гидрогалогенеза может отсутствовать или будет представлена одной (VIII) или двумя (VIII, IX) зонами палеокарстовых пустот.

Подобное явление имеет место и для пластово-поровых вод. На Балтийском щите, там, где осадочный чехол представлен только четвертичными песчано-глинистыми отложениями, наблюдается только зона эпигидрогенеза и гидродинамические зоны И и С (верхняя часть). В других районах, где на кристаллическом фундаменте, кроме четвертичных отложений, имеются осадочные дочетвертичные отложения с их водоносными горизонтами, будут развиты гидродинамические зоны И, С, Р и кроме зоны эпигидрогенеза, зона гидрогенеза и т. д.

Таблица 3, как и всякое обобщение, весьма схематична. Она только в первом приближении показывает гидрогеохимический разрез осадочного чехла платформ. Многообразие обстановок континентов нашей планеты заставляет уточнить направление и интенсивность гидрогеохимических процессов по зонам. Это схематически показано на рис. 1.

Гидрогеохимический процесс представляет стадии выщелачивания или засоления. В этом проявляется единство противоположных процессов рассеяния или выноса растворенных веществ и концентрации или накопления солей в растворе. При последнем происходит смена пресных вод солоноватыми, солеными и рассолами. При выщелачивании процесс имеет противоположное направление. Эти стадии выражаются гидрохимическими формациями и фациями (15).

По зонам мы имеем разные направления и стадии единого гидрогеохимического процесса.

В зоне эпигидрогенеза в зависимости от географической

зоны происходит выщелачивание или засоление. Выщелачивание наиболее интенсивно в тропической зоне и субтропиках, менее энергично протекает в тундровой зоне и наимень-

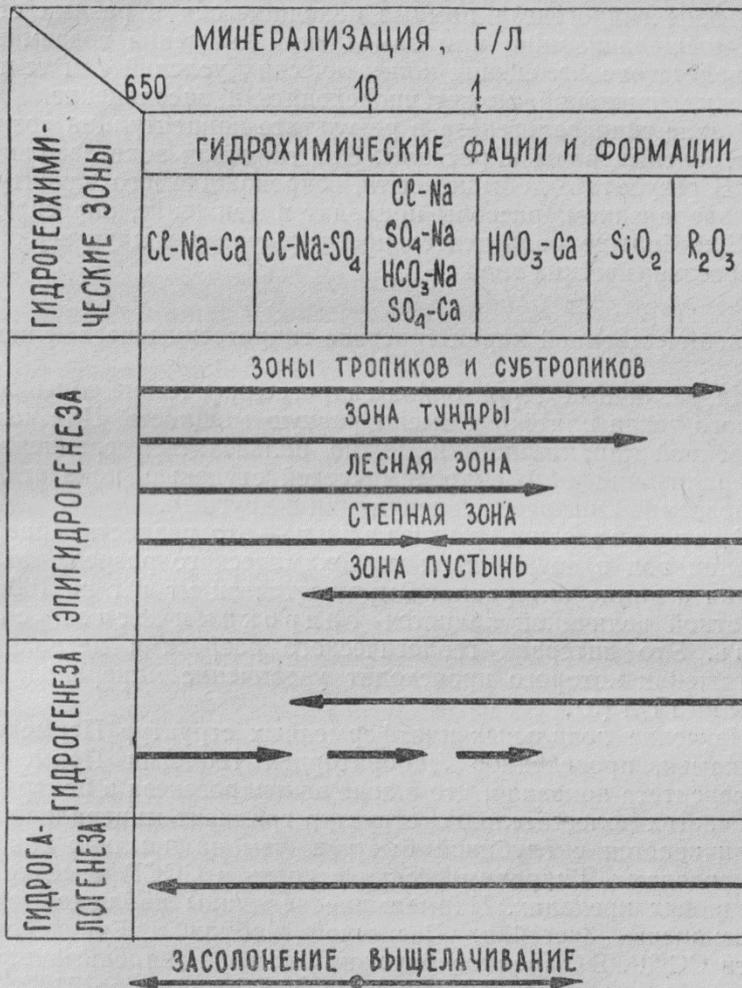


Рис. 1. Схема направления и интенсивности гидрогеохимических процессов по зонам.

шее в лесной зоне. В пустынной зоне наблюдается противоположный процесс засоления или эпигидрогалогенеза. Он менее интенсивен в степной зоне.

Степная зона, с ее сухими степями, степями и переходными лесостепями и полупустынями, характеризуется двумя противоположными гидрогеохимическими процессами. Это области засоления и слабого выщелачивания (рис. 1).

В зоне гидрогенеза помимо находящегося в разных стадиях выщелачивания, при замедлении движения подземных вод вследствие изменения климатических условий или тектонических движений, может происходить и засоление.

В зоне гидрогалогенеза в результате концентрации возникают соленые воды и рассолы. Это типичная зона засоления. В результате добычи нефти, сопровождаемого законтурным заводнением, рассолы приходят в движение, опресняются. Еще больше роль деятельности человека в двух верхних гидрогеохимических зонах.

О количественной характеристике гидрогеохимических зон

На различных территориях гидрогеохимические зоны осадочного чехла платформ имеют разную мощность. Для количественной характеристики можно пользоваться градиентом минерализации или гидрохимической ступенью, показателями подземной химической денудации и другими.

Градиент минерализации — это разность минерализации вод в двух точках гидрохимического разреза, отнесенная к длине интервала. Выражается он мг и г на 100 м. Обратной величиной является гидрохимическая ступень. Это интервал геологического разреза в метрах, на протяжении которого происходит увеличение минерализации воды на 1 г/л (3).

Изучение локальных платформенных структур Пермского Прикамья, проведенное Лабораторией геологии Пермского университета показало, что в зоне эпигидрогенеза в центральных частях положительных структур градиент минерализации увеличивается с глубиной быстрее, чем на крыльях или за их пределами. Гидрохимическая ступень в СССР изменяется в широких пределах. Наименьшие величины наблюдаются в артезианских бассейнах Восточной Сибири и Европейской части СССР. В Западносибирском бассейне гидрохимическая ступень доходит до 100 м и 1 г/л, а в Колпашово 818 м на 1 г/л. Максимальная величина гидрохимической ступени установлена в Прибайкальском артезианском бассейне Восточной Сибири, где она составляет 1384—2560 м на 1 г/л (3). Необходим подсчет градиентов минерализации и гидрохимической ступени для каждой гидрогеохимической зоны отдельно. В последнем случае, судя по минерализации артезианских

вод 0,5 г/л на глубине 1280 м и 1,3 г/л на глубине 1800 м, мы имеем дело с зонами эпигидрогенеза и гидрогенеза.

В карстовых районах градиент минерализации иногда называют градиентом выщелачивания. Интересный подсчет градиента минерализации произвели С. В. Альбов и В. Н. Дублянский для карстовых вод Ай-Петринского массива. По данным неопубликованной работы¹ градиент минерализации до глубины 100 м составляет 127 мг/100 м. Это верхняя часть зоны эпигидрогенеза. В нижней части он составляет только 8 мг/100 м.

Необходимо и в других районах вычислять эти показатели.

Показатели подземной химической денудации характеризуют верхние две гидрогеохимические зоны. Это подземная химическая денудация. Она представляет объем вынесенных подземными водами за год растворенных веществ, отнесенный к дренируемой площади и выражается в микронах. По подсчетам Г. К. Михайлова, для Среднего Прикамья она составляет 6—42 микрона. При этом большие цифры 18, 23, 29, 32, 33, 35 и 42 характеризуют локальные платформенные структуры, а участки с моноклинальным залеганием и прогибы отличаются подземной химической денудацией в 6, 7, 9, 11 микронов в год.

В карстовых районах подземная химическая денудация или сокращенно карстовая денудация — это слой карстующихся пород, который выносится в год с площади карстующегося массива. Он выражается в микронах. Определяют карстовую денудацию делением выносимого родниками объема растворенных веществ на площадь. Особенность ее заключается в том, что большая часть выносимого вещества обусловлена ростом подземных пустот, а не понижением поверхности карстового массива.

Карстовая денудация Горного Крыма при выносе в год 17 300 м³ с площади 490 км² будет 35,3 микрона. Для участка Девий—Ветлан Ксенофоновско-Ныробского карстового района Пермской области при площади 172 км² она будет 33,4 микрона. Денудация для одного из участков карбонатного карста Уфимского вала площадью в 336 км² составляет 12,7 микрона, а для участка гипсового карста Кишертско-Суксунского района площадью 60 км² — 117 микронов (20).

Необходимо накопление данных о карстовой денудации по другим районам СССР.

¹ Работа С. В. Альбова и В. Н. Дублянского публикуется в настоящем сборнике.

Скорость развития карста. Гидрогеологические и гидрохимические исследования позволяют, кроме карстовой денудации, подсчитать скорость развития или активность карста. По предложению Н. В. Родионова активность карстового процесса можно выразить количественно — отношением (в процентах) объема растворенной породы, выносимой подземными водами из какого-либо карстового массива за определенный отрезок времени и общему объему карстующихся пород. Это отношение он назвал степенью или показателем активности карстового процесса.

Показатель современной активности карста Н. В. Родионов выражает формулой:

$$A = \frac{v}{V} \cdot 100,$$

где v — объем растворенной породы, выносимой подземными водами из карстового массива;

V — общий объем карстующих пород.

Н. В. Родионов, а за ним и другие исследователи, этот показатель подсчитывают за тысячелетие.

По величине активности карста (в процентах за тысячелетие) карстовые районы автор делит на следующие классы:

Класс активности карста	Показатель современной активности карста
1-й — чрезвычайная	> 10
2-й — очень большая	10—1
3-й — большая	1—0,1
4-й значительная	0,1—0,01
5-й — малая	0,01—0,001
6-й — очень малая	0,001—0,0001
7-й — незначительная	< 0,0001

Приведем опубликованные данные о численных величинах показателя активности карста как для платформы, так и складчатых областей Кавказа и Крыма (в процентах за тысячелетие):

Карст карбонатных отложений

Кавказ, Сочинский район	0,49
Крым, Чатырдаг	0,15—0,20
Горный Крым	0,8
Уфимский вал	0,016
Район Балтийского моря	0,002
Средняя Азия, Алтайский хребет, полупустынный район	0,0001

Карст мела

Бассейн р. Северный Донец, мело-мергельные отложения	0,27
--	------

Карст гипса

Башкирская АССР	1,65
Кишертско-Суксунский район, Пермская область	0,8

Для карста соли эти показатели вероятно еще больше (20). Показателем подземной химической денудации можно пользоваться для характеристики относительной продолжительности пребывания отдельных участков зоны эпигидрогенеза в условиях интенсивного локального подземного стока (гидродинамическая зона С). Он представляет вес растворенных веществ в г, выносимых в секунду подземными водами с квадратного километра водосборной площади. По подсчетам Г. К. Михайлова, для рассмотренных уже локальных платформенных структур Пермского Прикамья он составляет для положительных хорошо промывающихся структур: 1,6; 1,9; 2,5; 2,7; 2,8; 2,9; 3,0; 3,6 г/сек. км², а для участков с моноклиналильным залеганием и прогибов: 0,4; 0,7; 0,8; 0,8; 1,0 г/сек. км². Таким образом, в пределах зоны эпигидрогенеза в различных структурных условиях наблюдается различная величина этого показателя. Показатель подземного химического стока изменяется по площади эпигидрогенеза. Для более древних, хорошо промытых структур он меньше, чем для сравнительно молодых промывающихся и непромытых.

* * *

Необходимо изучение гидрогеохимических зон трещинных вод.

В пределах зоны эпигидрогенеза для пластово-поровых и карстовых вод необходим подсчет градиента минерализации, гидрохимической ступени, показателя подземного химического стока и других количественных показателей для разных климатических природных зон.

Разработка учения о гидрогеохимических зонах — задача ближайшего будущего.

ЛИТЕРАТУРА

1. Гатальский М. А. Подземные воды и газы палеозоя северной половины Русской платформы. Тр. Гостоптехиздат, 1954.
2. Гидрохимическая карта СССР (подземные воды). М 1: 5 000 000, Госгеолтехиздат, М., 1958.
3. Гуревич М. С., Зайцев И. К., Толстихин Н. И. Региональные гидрохимические закономерности артезианских бассейнов СССР. Тр. Лаб. гидрогеол. пробл., т. 16, АН СССР, М., 1958.
4. Игнатович Н. К. О региональных гидрогеологических закономерностях в связи с оценкой условий нефтеносности. Сов. геология № 6, 1945.
5. Игнатович Н. К. Зональность формирования и деятельности

подземных вод в связи с развитием геоструктуры. Вопросы гидрогеологии и инж. геологии. Сб. 13, М., 1950.

6. Каменский Г. Н. Толстихина М. М., Толстихин Н. И. Гидрогеология СССР. Госгеолтехиздат, М., 1959.

7. Кротова В. А. Гидрогеология. Волго-Уральская нефтеносная область. Тр. ВНИГРИ, вып. 94, Л., 1956.

8. Личков Б. Л. Материалы к вопросу о классификации подземных вод. Геологический комитет. Материалы по общей и прикладной геологии, вып. 98, Л., 1928.

9. Личков Б. Л. Основные черты классификации подземных вод. Иссл. подз. вод СССР, в. 3, 1933.

10. Макаренко Ф. А. Труды Сочинской бальнеологической экспедиции Института геол. наук СССР, т. III, 1937—1939.

11. Максимович Г. А. Гидрохимические фации поверхностных геосфер. ДАН СССР, т. 39, № 8, 1943.

12. Максимович Г. А. О скорости миграции воды на Земле. Природа № 2, 1943.

13. Максимович Г. А. К характеристике гидрохимических фаций пластовых вод стратисферы. ДАН СССР, т. 45, № 6, 1944.

14. Максимович Г. А. Зональность почвенных, грунтовых, речных и озерных вод и гидродинамические зоны. ДАН СССР, т. 58, № 5, 1947.

15. Максимович Г. А. Химическая география вод суши. Географиз, М., 1955.

16. Максимович Г. А. Основные типы гидродинамических профилей областей карста карбонатных и сульфатных отложений. ДАН СССР, т. 112, № 3, 1957.

17. Максимович Г. А. Подрусловые пустоты и вопросы корреляции террас и горизонтальных карстовых пещер. Ученые записки Пермского университета, т. XI, вып. 2, 1957.

18. Максимович Г. А. Корреляция речных террас и горизонтальных карстовых пещер. Труды Комиссии по изучению четвертичного периода АН СССР, т. XIII, 1957.

19. Максимович Г. А. Гидродинамические зоны карстовых вод и основные типы подземного стока. Специальные вопросы карстоведения. АН СССР, М., 1962.

20. Максимович Г. А. Основы карстоведения, т. 1, Пермь, 1963.

21. Максимович Г. А. и Хейнсалу Ю. И. Новый тип гидродинамического профиля в Эстонской карстовой области. Известия АН Эстонской ССР, сер. технич. и физико-математич. наук, т. 8, № 3, 1959.

22. Перельман А. И. Катагенез. Изв. АН СССР, сер. геологическая, № 8, 1959.

23. Саваренский Ф. П. Классификация подземных вод. Избранные сочинения. Изд. АН СССР, 1950.

24. Сулин В. А. Условия образования и основы классификации природных вод и в частности вод нефтяных месторождений. Изв. АН СССР, отд. тех. наук № 9, 1945.

25. Сулин В. А. Воды нефтяных месторождений в системе природных вод. Гостоптехиздат, 1946.

26. Сулин В. А. Условия образования, основы классификации и состав природных вод, ч. 1, Изд. АН СССР, М., 1948.

27. Токарев А. Н. Радиогидрогеология, стр. 28—32, Госгеолтехиздат, М., 1956.

28. Ферсман А. Е. Геохимия, т. II, стр. 286—287, ОНТИ, Л., 1934.

29. Cvijic J. Hydrographie souterraine et évolution morphologique du Karst. Trav. Inst. de G. alpine. VI, 4, Grenoble, 1918.

Пермский университет