
**ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ПРИРОДНЫХ
И ПРИРОДНО-ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ**

УДК 556.114

ОБ ИНТЕНСИВНОСТИ РАЗВИТИЯ КАРБОНАТНОГО КАРСТА

© 2017 г. В. П. Зверев, И. А. Костикова

*Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер, д.13, стр. 2, Москва, 101000 Россия. E-mail: zverev@geoenv.ru*

Поступила в редакцию 21.11.2016 г.

Дана сравнительная оценка интенсивности выщелачивания карбоната кальция в разных природных уровнях, которая изменяется от ~ 0.3 г/с \cdot км² в платформенных условиях до ~ 2.4 г/с \cdot км² в горно-складчатых и до ~ 3.3 г/с \cdot км² в пределах территории крупных мегаполисов, т.е. примерно в пределах одного порядка. Среднее значение интенсивности выщелачивания карбоната кальция для осадочной оболочки континентальной коры составляет 0.42 г/с \cdot км².

Ключевые слова: карстовый процесс, подземные воды, растворение, термодинамический анализ, индекс неравновесности, карст в известняках.

Как показали Ф.П. Саваренский [12] и Д.С. Соколов [13], карст – это геологический и физико-химический процесс взаимодействия природных вод с растворимыми горными породами, который неизбежно развивается там, где имеется одновременное сочетание растворимых и водопроницаемых горных пород и растворяющих их движущихся подземных вод.

Если современная карстовая активность в гипсах и ангидридах сомнений не вызывает, то для карбонатных пород эта проблема решается неоднозначно. Многие полагают, что их растворение в современную эпоху происходит очень медленно и образование провалов в карбонатных породах связано с механическим разрушением карбонатных толщ.

Распространенность в земной коре карбонатов намного больше, чем хорошо растворимых сульфатов и галогенов. По данным А.Б. Ронова с соавторами [11], масса карбоната кальция в осадочной оболочке континентального блока земной коры составляет $0.245 \cdot 10^{24}$ г, т.е. примерно 12.9% всей ее массы ($1.9 \cdot 10^{24}$ г). Содержание эвапоритов (галогенов и сульфатов) на порядок меньше. Скорость выщелачивания карбоната кальция осадочной оболочки континентальной коры [6] достигает $1.98 \cdot 10^{15}$ г/год, т.е. удельное значение интенсивности его выщелачивания составляет 0.42 г/с \cdot км².

Приведенные данные дают представление о глобальных масштабах этого процесса.

В действительности интенсивность выщелачивания карбоната кальция в зависимости от геолого-структурных, ландшафтных и гидрогеологических условий отдельных регионов, а также под влиянием антропогенной деятельности, особенно в пределах городских агломераций, существенно отличается от средних значений [5].

Количественная оценка интенсивности выщелачивания карбоната кальция рассматривается на основании данных, полученных авторами для платформенных и горно-складчатых условий и в пределах городских агломераций.

ИНТЕНСИВНОСТЬ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ В ПЛАТФОРМЕННЫХ УСЛОВИЯХ

В качестве примера платформенного региона выбран детально изученный Московский артезианский бассейн (МAB), гидродинамические особенности и условия формирования химического состава подземных вод которого в основном определяются геолого-структурным строением Московской синеклизы, относящейся к Восточно-Европейской платформе, представляющей собой сложную систему водоносных горизонтов и комплексов, приуроченных к осадочной толще карбонатно-терригенных пород палеозойского, мезозойского и четвертичного возраста. Мощность осадочной толщи изменяется от 100–300 м на юго-западе до 3000–4000 м на северо-востоке. Этот район площадью около $360 \cdot 10^3$ км²

Таблица 1. Химические анализы подземных вод и индекс неравновесности ($\lg Q/K_0$ при 10 °С) системы водопорода известняково-доломитовой толщи Московского артезианского бассейна

Компоненты, мг/л		Водоносные комплексы					
		C ₂	C ₂	C ₁	C ₁	D ₃	D ₃
рН		6.95	7.3	7.35	6.85	7.06	7.37
Минерализация		230	588	588	763	2072	558.5
Cl ⁻		15	38	25	38	10.2	15.3
SO ₄ ²⁻		26	95	156	124	1229.9	124.7
HCO ₃ ⁻		126	295	246	397	408.8	427.1
Na ⁺		6.5	20.5	34.2	14.3	65.75	96.1
K ⁺		2.5	12.8	13	9.2	—	—
Ca ²⁺		38	67	64	123	352.7	66.1
Mg ²⁺		12	42	39	39	143.4	23.1
SiO ₂		4	16	10	16	—	—
Индекс неравновесности	Кальцит	-1.012	-0.146	-0.211	-0.234	0.207	0.058
	Доломит	-1.299	0.732	0.588	0.261	1.241	0.885

(примерно 0.24% от территории континентов) является водоразделом Балтийского, Черного, Азовского и Каспийского морей, отсюда берут начало крупнейшие реки Европейской России – Волга, Ока, Дон, Днепр и Западная Двина. Суммарный массопоток подземных вод на этой территории составляет $16.55 \cdot 10^{15}$ г/год [7, 9].

Основные водоносные комплексы изученной части МАБ – четвертичный, каменноугольный и девонский. Порово-пластовые воды четвертичных отложений находятся в зоне активного водообмена. Основной источник их питания – атмосферные осадки. Водоносный комплекс каменноугольных отложений характеризуется общим наклоном пластов, увеличением мощности и напоров в северо-восточном направлении. Преобладание в разрезе трещиноватых известняков, реже доломитов с достаточно выдержанными прослоями мергелей и глин, определяет наличие многоэтажной водонапорной системы с трещинно-пластовыми и карстово-пластовыми водами. Каменноугольные водоносные горизонты содержат преимущественно пресные гидрокарбонатные кальциевые, магниевые-кальциевые воды. При погружении в северо-восточном направлении условия водообмена осложняются, возрастает минерализация и изменяется химический состав подземных вод. Девонский водоносный комплекс также постепенно погружается в северо-восточном и восточном направлениях. Основные водовмещающие породы – известняки и доломиты карбонатной формации. Водоносный комплекс каменноугольных отложений и верхние водоносные горизонты девона находятся под влиянием местной речной сети,

включая даже небольшие притоки. Гидрогеохимически это сравнительно маломинерализованные (200–750 мг/л) гидрокарбонатно-кальциевые, реже магниевые-кальциевые воды. В табл. 1 приведены характерные химические анализы подземных вод средне-, нижнекаменноугольных и девонских отложений.

Водообильность трещинно-карстовых водоносных горизонтов наибольшая в долинах рек, резко снижается на водоразделах. Вынос химических элементов подземными водами из толщи горных пород в естественных условиях осуществляется в основном из зоны активного водообмена, охватывающей верхние водоносные горизонты, дренируемые местной речной системой, включая, конечно, и крупные реки.

Термодинамическое моделирование состояний химических элементов в подземных водах известняково-доломитовой формации верхнего девона и карбона центральной части Московского артезианского бассейна, выполнено по программе SOLMINEQ-88 [14]. Полученные значения индексов неравновесности между подземными водами и карбонатами известняково-доломитовой толщи средне-, нижнекаменноугольных и девонских отложений приведены в табл. 1.

Установлено, что подземные воды не равновесны с основным порообразующим минералом – кальцитом, и в большинстве случаев равновесны с доломитом. Это показывает, что в верхних частях осадочной толщи центральной части МАБ существуют благоприятные условия для растворения карбонатов и выноса кальция.

Итогом всех химических реакций, реализуемых между водой и породой, в зоне выветривания является, как уже сказано выше, поступление в жидкую фазу строго определенных количеств химических элементов, что дает возможность количественной оценки интенсивности подобных процессов. На основании этого Р. Гаррелсом и Д. Маккензи [1] разработан метод стехиометрического баланса масс, позволяющий количественно оценивать вклад тех или иных минералогических разностей в поступление химических элементов в природные воды. Одновременно имеется возможность дать и количественную оценку масс растворенной и новообразованной в результате этого процесса пород [3].

Стехиометрический гидрогеохимический баланс модели химического выветривания Центральной части Европейской России выполнен на основании средних химических анализов атмосферных осадков и подземных вод зоны активного водообмена [3]. Установлено, что интенсивность выветривания, фактически растворения карбонатов составляет для всей центральной части Московского артезианского бассейна $2.71 \cdot 10^{12}$ г/год. Удельные значения интенсивности выщелачивания карбонатов в пределах МАБ составляют 0.29 г/с км², что несколько ниже, чем для континентов в целом, что вполне естественно, так как в горно-складчатых областях он существенно выше.

ИНТЕНСИВНОСТЬ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ КАРБОНАТА КАЛЬЦИЯ В ГОРНО-СКЛАДЧАТЫХ РЕГИОНАХ

Оценка интенсивности выщелачивания карбонатов в горно-складчатых регионах выполнена на примере Юго-Западного склона Большого Кавказа, относящегося к бассейну Черного моря.

Скорость развития процесса выщелачивания в подобных природных условиях определяется большой разницей между абсолютными отметками подземных вод, областей питания и разгрузки подземных вод, высокой нормой атмосферных осадков, значительной расчлененностью территории, густой речной сетью, что является причиной более высоких значений подземного стока в пределах горно-складчатых сооружений по сравнению с платформенными областями.

Мощная толща карбонатных пород – известняки и доломиты верхней юры и мела – в пределах Юго-Западного склона Большого Кавказа, характеризуется благоприятными условиями подземного стока, модуль которого превышает 20 л/с · км² [4]. Он формируется типичными трещинно-карстовыми водами, характеризуется сосредоточенной разгрузкой с образованием значительного количества источников. Наиболее мощные источники – Речкисцкали и Черная речка (с дебитом $1-2$ м³/с) являются истоками одноименных рек. Подземные воды карбонатных пород в зоне активного водообмена имеют выдержанную минерализацию ($0.2-0.4$ г/л) и характеризуются гидрокарбонатным кальциевым составом (табл. 2) с $pH > 8.05$.

Термодинамическое моделирование состояний химических элементов в подземных водах, дренирующих карбонатные породы меловых отложений, выполнены, как и для Московского бассейна, по программе SOLMINEQ [14]. Индексы неравновесности подземных вод источников Черная речка и Речкисцкали с карбонатными породами меловых отложений (см. табл 2) имеют положительное значение, т.е. в области разгрузки они насыщены по отношению к карбонату кальция. В то же время воды единственного источника их питания – атмосферных осадков – высоко

Таблица 2. Химический состав природных вод Юго-Западного Кавказа и индекс их неравновесности

Проба воды	pH	Минерализация, мг/л	Компоненты мг/л							Индекс неравновесности кальцита
			K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	
Атмосферные осадки, Малтаква	6.05	9.73	0.25	0.92	1.15	0.23	3.78	2.06	1.34	-4.832
Источник Черная речка	8.05	248.63	0.83	8.0	39.1	8.5	169.6	8.0	2.8	0.392
Источник Речкисцкали	8.1	240.25	0.56	2.5	42.3	11.7	158.6	16.0	5.4	0.507

неравновесны с карбонатом кальция. Это показывает, что подземные воды атмосферного происхождения в ходе переноса от области питания к местам разгрузки, взаимодействуя с карбонатными породами, производят большую работу по их выщелачиванию. Таким образом, растворение известняков и вынос его продуктов с подземными водами приводит к образованию мощных систем карстовых полостей – пещер, среди которых следует отметить Новоафонские и Воронцовские.

Кинетика растворения кальцита в пределах Юго-Западного Кавказа дана на примере массива карбонатных пород в районе разгрузки источника Черная речка. Методом стехиометрического баланса масс оценена интенсивность выноса иона Ca^{2+} , составляющая $1.34 \text{ г/с} \cdot \text{км}^2$. Исходя из этого, удельная скорость выщелачивания известняков оценена в $2.41 \text{ г/с} \cdot \text{км}^2$, что на порядок выше, чем в центральной части Русской платформы.

ИНТЕНСИВНОСТЬ ВЫЩЕЛАЧИВАНИЯ КАРБОНАТОВ В ПРЕДЕЛАХ КРУПНЫХ МЕГАПОЛИСОВ

Оценка интенсивности выщелачивания карбонатов в пределах крупных мегаполисов дана на примере территории г. Москвы, расположенного в районах распространения растворимых (карстующихся) горных пород. Карстовые процессы на территории г. Москвы обусловлены наличием растворимых водопроницаемых карбонатных пород карбона, залегающих, под терригенными мезозойско-кайнозойскими отложениями на глубине нескольких десятков метров [10]. Карстовые процессы в этих породах, начавшиеся с конца позднего мела и приуроченные к крупным эрозионным врезам, сформировавшимся во время континентальных перерывов раннего и среднего карбона и перми, продолжают и до настоящего времени.

В естественных условиях к карбонатным отложениям был приурочен напорный водоносный горизонт, разгрузка которого была сосредоточена в долинах рек Москвы и Яузы. В процессе переноса от находящихся южнее областей питания подземные воды, постепенно насыщаясь карбонатом кальция, приходили в равновесие с карбонатными породами, что препятствовало растворению известняков и образованию карста в пределах территории Москвы.

Интенсивное освоение городской территории с 30-х годов прошлого века (расширение границ города, рост промышленности и населения)

потребовало значительного увеличения объемов водоснабжения, в результате чего гидрогеологические условия территории Московской городской агломерации претерпели существенные изменения. В итоге усиленной эксплуатации подземных вод карбонатных отложений и под влиянием откачек “Метростроя” в пределах центральной части Москвы произошло существенное падение пьезометрических уровней карбонатных водоносных горизонтов. Таким образом были созданы благоприятные условия для перетока поверхностных вод в нижележащие горизонты карбонатных пород и резкого увеличения интенсивности водообмена. В результате этого гидрогеохимические параметры подземных вод существенно изменились. В естественных условиях (более или менее закрытая система с невысокими парциальными давлениями CO_2) подземные воды карбонатного водоносного горизонта были равновесны с известняками карбона [7]. Развитие депрессионной воронки способствовало формированию открытой системы, росту парциального давления CO_2 и изменению значений pH подземных вод карбонатных отложений от 7.5–8.0 до 5.5–6.5. В итоге показатель неравновесности системы кальцит-вода стал отрицательным, и подземные воды из равновесных перешли в неравновесные к ним, т.е. создались благоприятные условия для растворения карбоната кальция. Наиболее интенсивно этот процесс развивается в пределах участков древних карстовых нарушений и провалов, заполненных щебнем, дресвой и мукой разрушенных известняков, цементированных вторичным карбонатом кальция [8].

Сказанное хорошо иллюстрируется примерами развития современного карста в районе, прилегающем к Хорошевскому шоссе, где благодаря наличию значительных поверхностей взаимодействия воды и породы и измененным гидродинамическим и гидрогеохимическим условиям происходят растворение карбонатного цемента и наиболее мелких частиц разрушенных известняков, активизация сульфидных процессов и возникновение известных провалов. В табл. 3 (результаты термодинамического моделирования по программе SOLMINEQ-88 [14]) показано, что подземные воды касимовского и подольско-мячковского горизонтов верхнего и среднего карбона не равновесны с карбонатом кальция, а нижнего (алексино-протвинского) равновесны. Это свидетельствует о развитии процесса растворения карбоната кальция в результате активной инфильтрации высоко неравновесных атмосферных осадков и его дальнейшем переносе

Таблица 3. Химический состав природных вод на территории г. Москвы и индекс их неравновесности

Тип природных вод и № скважины	Водоносный горизонт	pH	Минерализация, мг/л	Na ⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	Индекс неравновесности кальцита
Атмосферные осадки		5.6	17.66	0.15	0.11	0.64	0.04	0.67	5.60	3.78	-7.223
200142	C _{3 ksm}	6.25	786.2	52.0	5.2	138.0	21.0	115.0	91.0	363.0	-0.598
200148	C _{2 pd-mc}	6.45	8976	87.5	5.1	146.0	19.0	165.0	97.0	378.0	-0.370
214104	C _{1 al-pr}	7.8	792.5	66.2	12.5	103.0	38.0	135.0	150.0	288.0	+0.696

подземными водами в измененных гидродинамических условиях.

Интенсивность растворения известняков карбонатноугольных отложений оценена для территории г. Москвы путем изучения изменения массопотока иона Ca²⁺ в подземных водах. Установлено, что за время интенсивного роста города с территории, ограниченной МКАД, за последние 60 лет вынос кальция подземными водами вырос с $1.35 \cdot 10^{10}$ до $3.64 \cdot 10^{10}$ г/год. Увеличение выноса Ca²⁺ подземными водами происходит за счет выщелачивания карбоната кальция (среди компонентов антропогенного загрязнения Ca²⁺ практически отсутствовал). Следовательно, на территории Москвы в пределах МКАД средняя интенсивность его выщелачивания увеличилась от 0.23 до 0.62 г/с · км². Карстовый процесс развивается не повсеместно по площади, а приурочивается к ослабленным зонам. Так, в пределах зоны развития современных карстово-суффозионных процессов интенсивность выщелачивания карбоната кальция достигает 3.33 г/с · км² [7], что почти в 5 раз выше, чем в среднем на территории г. Москвы.

ВЫВОДЫ

Полученные данные позволяют дать сравнительную оценку интенсивности выщелачивания карбонатов кальция на разных природных уровнях, которая изменяется от ~0.3 г/с · км² в платформенных условиях до ~2.4 г/с · км² в горно-складчатых и от ~0.62 до ~3.3 г/с · км² в пределах территории крупных мегаполисов, т.е. примерно в пределах одного порядка, приближаясь к интенсивности выщелачивания гипса подземными водами в платформенных условиях [2].

В заключение следует подчеркнуть, что единственным объективным методом прогноза развития карста является гидрогеохимический.

Для его реализации в пределах карстоопасных участков необходим систематический контроль за химическим составом подземных вод, циркулирующих в растворимых породах, с последующим термодинамическим моделированием равновесно-неравновесного состояния в системе вода-порода. Стабильно высокие отрицательные значения индексов неравновесности, наряду с высокими скоростями движения подземных вод, будут наиболее объективными показателями карстовой опасности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Гаррелс Р.М., Крайст Ч.Л.* Растворы, минералы, равновесия. М.: Мир, 1968. 368 с.
2. *Зверев В.П.* Гидрогеохимические исследования системы гипсы-подземные воды. М.: Наука, 1967. 99 с.
3. *Зверев В.П.* Роль подземных вод в миграции химических элементов. М.: Недра, 1982. 182 с.
4. *Зверев В.П.* Энергетика гидрогеохимических процессов современного седиментогенеза (на примере Юго-Западного Кавказа) // Тр. ГИН АН СССР. Вып. 362. 1983. 135 с.
5. *Зверев В.П.* Подземные воды земной коры и геологические процессы. 2-е изд. М.: Научный мир, 2007. 256 с.
6. *Зверев В.П.* Система природных вод Земли. М.: Научный мир, 2013. 312 с.
7. *Зверев В.П., Костикова И.А.* Гидрогеохимические особенности развития карста в современных условиях // Геоэкология. 2015. № 3. С. 248–256.
8. *Кутепов В.М., Кожевникова В.Н.* Устойчивость закарстованных территорий. М.: Наука, 1989. 151 с.
9. *Лебедева Н.А.* Естественные ресурсы подземных вод Московского артезианского бассейна. М.: Наука, 1972. 148 с.
10. Москва: город и геология /Под ред. В.И. Осипова, О.П. Медведева. М.: Моск. Лит. и Картолит, 1997. 400 с.

11. Ронов А.Б., Ярошевский А.А., Мигдисов А.А. Химическое строение земной коры и геохимический баланс главных элементов. М.: Наука, 1990. 182 с.
12. Саваренский Ф.П. Избранные сочинения / Отв. ред. Н.Н. Славянов. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1950. 412 с.
13. Соколов Д.С. Основные условия развития карста. М.: Госгеолтехиздат, 1962. 322 с.
14. Perkins E.H., Kharaka Y.K., Gunter W.D., Debrael J.D. Geochemical modeling of water-rock interaction using SOLMINEQ 88 // ACS Symposium Series. 1990. № 416. P. 117–127.
6. Zverev, V.P. *Sistema prirodnikh vod Zemli* [The Natural water system of the Earth]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2013, 312 p. (in Russian).
7. Zverev, V.P. Kostikova, I.A. Hidrogeokhimicheskie osobennosti razvitiya karsta v sovremennykh usloviyakh [Hydrogeochemical specifics of karst development under current conditions] *Geoekologiya*, no. 3, 2015, pp. 248–256. (in Russian).
8. Kutepov, V.M., Kozhevnikova, V.N. *Ustoichivost' zakarstovannykh territorii* [Stability of karstified territories], Moscow, Nauka, 1989, 151 p. (in Russian).
9. Lebedeva, N.A. *Estestvennye resursy podzemnykh vod Moskovskogo artezianskogo basseina* [Natural resources of groundwater in the Moscow artesian basin], Moscow, Nauka, 1972, 175 p. (in Russian).
10. *Moskva. Geologiya i gorod* [Moscow. Geology and city]. V.I. Osipov, O.P. Medvedev, Eds., Moskovskie uchebniki i kartolitografiya Publ., 1997, 400 p. (in Russian).
11. Ronov, A.B., Yaroshevskii, A.A., Migdisov, A.A. *Khimicheskoe stroenie zemnoi kory i geokhimicheskii balans glavnykh elementov* [Chemical structure of the Earth's crust and the geochemical balance of major elements], Moscow, Nauka, 1990, 182 p. (in Russian).
12. Savarenskii, F.P., *Izbrannye sochineniya* [Selected works], Slavyanov, N.N, Ed., Moscow, Izd. AN SSSR, 1950, 412 p. (in Russian).
13. Sokolov, D.S. *Osnovnye usloviya razvitiya karsta* [Basic conditions of karst development], Moscow, Gosgeoltekhizdat, 1962, 322 p. (in Russian).
14. Perkins, E.H., Kharaka, Y.K., Gunter, W.D., Debrael, J.D. Geochemical modeling of water-rock interaction using SOLMIEQ 88. ACS Symposium Series. Symp. Ser., 1990, no. 416, pp. 117–127.

REFERENCES

1. Garrels, R.M., Kraist, Ch.L. *Rastvory, mineraly, ravnovensiyaya* [Solutions, minerals and equilibria]. Translated from English, Moscow, Mir, 1968, 368 p. (in Russian).
2. Zverev, V.P. *Gidrogeokhimicheskie issledovaniya sistemy gipsy – podzemnye vody* [Hydrogeochemical studies of gypsum-groundwater system]. Moscow, Nauka, 1967. 99 p. (in Russian).
3. Zverev, V.P. *Rol' podzemnykh vod v migratsii khimicheskikh elementov* [The role of subsurface water in migration of chemical elements]. Moscow, Nedra, 1982, 186 p. (in Russian).
4. Zverev, V.P. *Energetika gidrokhimicheskikh protsessov sovremennogo sedimentogeneza (na primere yugo-zapadnogo Kavkaza)* [Energetics of recent sedimentation processes (with examples of the South-Eastern Caucasus). *Trudy GIN AN SSSR, vyp. 362* [Proceedings of Geological Institute, USSR Academy of Sciences, issue 362], Moscow, Nauka, 1983, 136 p. (in Russian).
5. Zverev, V.P. *Podzemnye vody zemnoi kory i geologicheskie protsessy* [Groundwater in the Earth's crust and geological processes]. Moscow, Nauchnyi mir Publ., 2007, 258 p. (in Russian).

ABOUT THE INTENSITY OF CARBONATE KARST DEVELOPMENT

V. P. Zverev, I. A. Kostikova

*Sergeev Institute of Environmental Geoscience, Russian Academy of Sciences,
Ulanskii per., 13, bld. 2, Moscow, 101000 Russia. E-mail: zverev@geoenv.ru*

A comparative assessment of calcium carbonate leaching intensity is made for environmental areas of different levels. It is found to vary from $\sim 0.3 \text{ g/s} \cdot \text{km}^2$ in platforms to about $2.4 \text{ g/s} \cdot \text{km}^2$ in mountains, and up to $\sim 3.3 \text{ g/s} \cdot \text{km}^2$ in megacities, i.e., approximately within one order of magnitude. The obtained data suggest that under the current conditions controlled by the anthropogenic activity, precipitation infiltration into rock massifs, upon intense snow melting, in particular, is accompanied by gradual leaching of carbonate rock varieties. Karst funnels forming on the surface testify to the karst process developing in the upper strata of carbonate rock massifs under the effect of anthropogenic activity.

The mean rate of carbonate leaching within the zone of karst-suffosion development in Moscow is an order of magnitude higher than the same parameter for carbonate karst on platforms, which develops below the local drainage bases and coincides with the rates of gypsum leaching.

The average value of the calcium carbonate weathering intensity in the sedimentary layer of continental crust is estimated at $0.42 \text{ g/s} \cdot \text{km}^2$.

Key words: karst processes, groundwater, dissolution, thermodynamic analysis, the index of non-equilibrium; karst in limestone.