



УДК 551.4.042

DOI 10.18413/2075-4671-2019-43-4-386-399

**СКОРОСТЬ ПОДЗЕМНОЙ ХИМИЧЕСКОЙ ДЕНУДАЦИИ
И АКТИВНОСТЬ КАРСТОВЫХ ПРОЦЕССОВ МРАССКОГО И КУЗНЕЦКОГО
КАРСТОВЫХ РАЙОНОВ (АЛАТАУСКО-ШОРСКОЕ НАГОРЬЕ)
НА ПРИМЕРЕ КЛЮЧЕВЫХ КАРСТОВЫХ УЧАСТКОВ**

**SPEED OF THE UNDERGROUND CHEMICAL DENUDATION
AND ACTIVITY OF KARST PROCESSES OF MRASSKY AND KUZNETSK KARST
DISTRICTS (ALATAUSKO-SHORSKOE UPLANDS)
ON THE EXAMPLE OF KEY KARST SITES**

Р.А. Ковалёв

R.A. Kovalev

Национальный исследовательский Томский государственный университет,
Россия, 634050, г. Томск, пр. Ленина, 36
Новокузнецкий филиал-институт Кемеровского государственного университета,
Россия, 654041, г. Новокузнецк, ул. Циолковского, 23

National Research Tomsk State University,
36 Lenina Av, Tomsk, 634050, Russia
Novokuznetsk Branch Institute Kemerovo State University,
23 Tsiolkovsky St, Novokuznetsk, 654041, Russia

E-mail: razors26@rambler.ru

Аннотация

В данной работе приведены результаты исследований скоростей и активности карстовых процессов на территории Мрасского и Кузнецкого карстовых районов Алатауско-Шорского нагорья. Впервые рассчитаны показатели подземной химической денудации для данной территории на примере ключевых карстовых участков, а также определена степень активности карстовых процессов. Полученные значения от 49.92 до 73.75 м³/год × км² или мм/1000 лет вполне характерны для данной физико-географической и геологической обстановки. Малая активность карстовых процессов позволяет судить об устойчивости к названным процессам изучаемых закарстованных территорий. Полученные данные являются отправной точкой для исследования скоростей карстовых процессов Алатауско-Шорского нагорья, последующего сравнительного анализа и выявления динамики процесса.

Abstract

New data on speed and activity of karst processes in the territory of Mrassky and Kuznetsk karst districts of Alatausko-Shorsky uplands are provided in this work. Indexes of an underground chemical denudation, for this territory which is one of the key quantitative indices of speed of karst process, on the example of key karst sites are for the first time calculated, and the degree of activity of karst processes as a percentage in a millennium is also defined. Chemical denudation is a conditional calculated value showing how much mm the earth's surface would decrease if these processes developed evenly over 1000 years. This is the meaning of denudation as a comparative value. Therefore, chemical denudation indicators reflect the intensity of karst processes only at the present stage. The received values from 49.92 to 73.75 m³/year × km² or mm/1000 are quite characteristic years of this physiographic and geological situation. It indirectly is confirmed in comparison with the data obtained by other researchers (J. Korbelt, M. Pulina) in other karst areas of the temperate climatic zone. The small activity of karst processes allows to judge resistance to the called processes of the studied carstified territories. The obtained data are a starting point for a research of speeds of karst processes of Alatausko-Shorsky uplands, the subsequent comparative analysis and identification of dynamics of process.

Ключевые слова: Горная Шория, карст, химическая денудация, известняк, карстовые источники.
Keywords: Gornaya Shoriya, karst, chemical denudation, limestone, karst springs.

Введение

Большую часть своей истории геоморфология ставила перед собой задачу – изучение рельефа для познания земных недр. В последние годы возникло экологическое направление в геоморфологии – науке, изучающей рельеф, его происхождение, возраст и эволюцию с целью определения его роли в системе «природа – население – хозяйство». Такой взгляд на рельеф оказался возможен в связи с тем, что к началу 1980-х гг. произошел коренной переход от описательного подхода к изучению геоморфологических объектов к их динамическому анализу, от форм рельефа к рельефообразующим процессам, которые можно выразить триадой «форма – процесс – следствие». Одной из главных задач экологической геоморфологии является изучение опасных рельефообразующих процессов [Кузьмин, Плюснин, 2009; Евсева, Осинцева, 2013].

Карст является одним из наиболее сложных и трудно прогнозируемых опасных геоморфологических и инженерно-геологических процессов. Развиваясь сотни миллионов лет (при соответствующих структурно-геологических и гидрогеологических условиях), он опасно проявиться может за считанные минуты, особенно при непредсказуемом провоцирующем техногенном воздействии. Каждый из основных литологических (карбонатный, сульфатный, хлоридный) типов карста, несмотря на значительную разницу в скорости растворения пород, эволюционирует, как правило, скрытно, вне пристального внимания человека, но нередко приводит к неблагоприятным последствиям, несущим ущерб [Костарев, 2015].

Для прогнозирования развития карста, особенно быстропротекающего, чрезвычайно важно знать скорости химической денудации карстующихся пород. Химическая (карстовая) денудация является одним из основных количественных показателей скорости карстового процесса. Применение количественных методов определения скорости карстовой денудации важно для целей прогноза и практики. Анализируя количественные методы, отражающие скорость карстового процесса, Н.А. Гвоздецкий и другие исследователи отмечают их большое значение в гидротехническом строительстве и других прикладных областях [Гвоздецкий, 1970; Трофимова, 2006].

Количественной мерой денудации земной поверхности в карстовых регионах является величина, характеризующая скорость ее снижения в единицу времени (мкм/год, мм/1000 лет, $\text{м}^3/\text{км}^2 \times \text{год}$). Эта величина используется для региональной оценки интенсивности карстовых процессов, выявления их широтной зональности, высотной поясности и локальных особенностей, установления связей между скоростью карстового процесса и морфологии карстовых форм. Для оценки устойчивости закарстованных территорий рекомендуется использовать показатель активности карстовых процессов [Дублянский и др., 1984].

Впервые оценку величины карстовой денудации в горах Южной Сибири для нескольких речных бассейнов осуществил французский карстолог Корбел [Corbel, 1957]. Затем в 1968 г. величину химической денудации для долины р. Агаты (Солгонский кряж) рассчитал В.И. Беляк [1968], а М. Пулина [Pulina, 1968] провел подробные исследования для речных бассейнов Иркутского амфитеатра. Исследователь карста Горного Алтая А.М. Маринин в 1973 г., обобщая свои данные, рассчитал карстовую денудацию для бассейнов рек Горного Алтая, таких как Катунь, Чуя, Майма, Иша, Песчаная, Ануй [Маринин, 1990].

Наиболее современные данные представлены в работе Е.В. Трофимовой [2006], где использовалась методика Ж. Корбеля и М. Пулины для расчета показателей для 127 речных бассейнов Восточной Сибири и Дальнего Востока с выявленным карбонатным карстом.



Как видно из приведенного выше списка исследователей, большинство полученных данных отражают общую химическую денудацию по целым речным бассейнам. В 2017 г. автором была предпринята попытка расчета скорости подземной химической денудации для карстового участка горы Кокуя (хр. Алтын-Ту) Восточно-Алтайской карстовой области. Полученные показатели ($78.68 \text{ м}^3/\text{км}^2 \times \text{год}$ или $\text{мм}/1000 \text{ лет}$) увязываются с физико-географическими и геологическими условиями, которые характерны для данной территории [Ковалёв, 2018].

Объекты и методы исследования

К сожалению, четкие рекомендации по методике определения химической (карстовой) денудации и активности карстового процесса в современной литературе отсутствуют. Для их расчета предложено более десятка формул, в которых для обозначения одних и тех же величин применяются разные символы. Полученные величины именуется показателями активности карстового процесса, показателями скорости карстовой денудации [Corbel, 1959], карстовой коррозии, климатической коррозии, внутренней абляции [Pulina, 1974], карстовой эрозии. Наиболее целесообразно применение термина «химическая денудация» [Дублянский и др., 1984].

Наиболее наглядные и важные практические результаты, на наш взгляд, дают формулы, предложенные Ж. Корбелем и М. Пулиной, которые выражают количество вынесенного вещества из карстового массива за определенный срок времени в кубических метрах на квадратный километр или в миллиметрах за 1000 лет. Эти абсолютные величины обладают определенной размерностью, что даёт вполне сравнимые и наглядные результаты [Гвоздецкий, 1988].

Цель настоящего исследования: продолжить изучение химической денудации карстовых районов гор Южной Сибири, применяя гидрометрические методы расчетов, предложенные Ж. Корбелем и М. Пулиной, на основе которых выявить их широтную зональность, высотную поясность и локальные особенности, выявить связь между скоростью карстового процесса и морфологией карстовых форм, а также установить корреляционные связи между полученными результатами и уже известными. На основе полученных данных о скорости подземной химической денудации рассчитать активность карстового процесса для изучаемой территории, на основе которой установить устойчивость к данным процессам закарстованной территории. При исследовании скоростей карста автором были использованы следующие методы: полевые, геологические, геоморфологические, картографические, использование данных ДЗЗ, гидролого-гидрохимические, гидрологические, сравнительно-географические.

Физико-географическая и геологическая обстановка, определяющая развитие карста

Кузнецкий и Мрасский карстовые районы входят в состав горных сооружений северных отрогов Абаканского хребта и юго-восточной части Горной Шории, которые в свою очередь входят в состав Алатауско-Шорского нагорья Салаиро-Кузнецкой горной провинции [Чернов и др., 1988].

Согласно схеме карстолого-спелеологического районирования, разработанной в рамках проекта РГО в 2015 г. по кадастровому учету всех карстовых и подземных объектов, Кузнецкий и Мрасский карстовые районы относятся к карстовой области Кузнецкого Алатау и Горной Шории Салаиро-Кузнецкой карстовой провинции, которая входит в состав Алтае-Саянской карстовой страны. Ключевыми участками, на территории которых проводились исследования, являлись: Портал-Хабзасский карстовый участок (Аскизский подрайон Кузнецкого карстового района), Карчитский карстовый участок и Патынский подрайон (Мрасского карстового района). Магистральными водными артериями, которые одновременно служат базисом эрозии и зоной разгрузки карстовых вод для изучаемых карстовых массивов, явля-

ются р. Мрассу (Карчитский участок), р. Аскиз (Портал-Хабзасский участок) и р. Кызлас (Патынский подрайон) (рис. 1) [Салаиро-Кузнецкая ..., 2019].

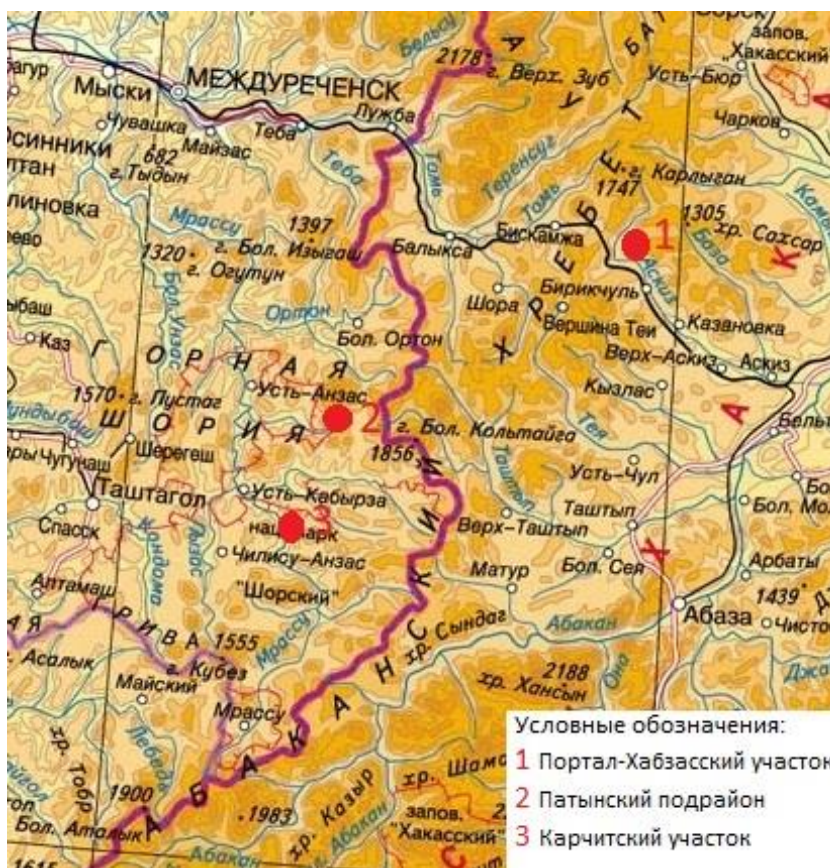


Рис. 1. Схема расположения карстовых участков, в пределах которых проводились исследования.
 М: в 1 см 25 км

Fig. 1. The card location of karst sites within which researches were conducted. M: 1 cm 25 km

Карстующиеся породы изучаемых карстовых массивов представлены интенсивно закарстованными и дислоцированными карбонатами Синийского комплекса Енисейской свиты (известняки, мраморы, доломиты) и нижнекембрийскими тонкослоистыми, массивными, брекчевидными известняками Усинской свиты. Мощность карбонатных пород от зоны питания карстовых массивов до урезом магистральных рек (базисов эрозии) достигает 450 м (Патынский подрайон), средняя мощность — 150 м [Геологическая карта..., 2019; Государственная геологическая карта..., 2019].

Карстовый рельеф представлен преимущественно в низкогорной части районов (400–900 м), для которой характерен денудационно-эрозионный рельеф, созданный эрозией, переработанный склоновыми процессами [Геоморфологическая схема..., 2019]. В данном диапазоне высот созданы благоприятные условия для протекания карстовой денудации, которая выражена в рельефе, согласно классификации Г.А. Максимовича [1963], многочисленными эрозионно-коррозионными, провальными и суффозионными карстовыми воронками и понорами. Поверхностные карстовые формы локализованы в основном по ложбинам стока в так называемых сухих логах, а также на слабонаклонных платообразных поверхностях.

В соответствии со схемой биоклиматических подразделений территории гор Южной Сибири Горная Шория и северные отроги Абаканского хребта относятся к избыточно-влажной климатической фации. Среднегодовое количество осадков составляет 950 мм, в теплое время года – в среднем 670 мм, в холодное – 270 мм. Среднегодовая температура составляет – 0.5 °С. Для данной территории характерен мощный снеговой покров – 1 м и

более, а в логах он достигает 2–3 м, благодаря которому почва не промерзает и коррозионная деятельность идет круглый год [Крапивкина, 2009]. При таких условиях создается усиленный водообмен в трещинах и значительно повышается выщелачивание карбонатной породы.

Широкое развитие карстового рельефа предопределило большую роль подземного питания многих рек, в том числе главных магистральных, таких как Аскиз, Кызас, Мрассу, протекающих в пределах изучаемых карстовых участков. Многочисленные ручьи, берущие своё начало в пределах карстовой водосборной площади, достигая зоны контакта интрузивных и карбонатных пород либо свободно протекая по зоне карстующихся пород, переводят свой сток под землю, выходя в виде денудационных или трещинных (в местах развития дизъюнктивных нарушений в долинах главных транзитных рек) карстовых источников (включая) [Максимович, 1969].

Наиболее обширные площади в районе заняты черневой тайгой, которая с подъемом в горы сменяется темнохвойной. Черневая тайга является реликтовым типом растительности. На местах рубок и пожаров в прошлом сформировались вторичные березовые и осиновые леса. Территория, занятая черневой тайгой и вторичными березово-осиновыми лесами, характеризуется господством подзолистых и дерново-подзолистых почв. Кислая реакция подзолистых почв повышает агрессивность инфильтрующихся вод, что способствует растворению подстилающих карбонатных пород [Ковалев, Волковинцер, 1968]. При затяжных дождях, характерных для западного макросклона Алатауско-Шорского нагорья, проникновение воды через кислые почвы стабилизируется, и агрессивные атмосферные осадки проникают на большую глубину карстующихся толщ. Горнолесные ландшафты с данным типом почв создают весьма благоприятные условия для развития карста.

Результаты и их обсуждение

Ключевыми карстовыми массивами, на территории которых проводились исследования по определению скоростей подземной химической денудации, стали юго-западный склон горы Патын (Патынский подрайон) (рис. 2), карстовый массив над пещерой Грандиозная (Карчитский участок) (рис. 3), плато Чизень (Портал-Хабзасский участок) (рис. 4), которые были определены автором на основе материалов [Государственная геологическая карта ..., 2019] поисковых маршрутов и анализа данных ДДЗ.

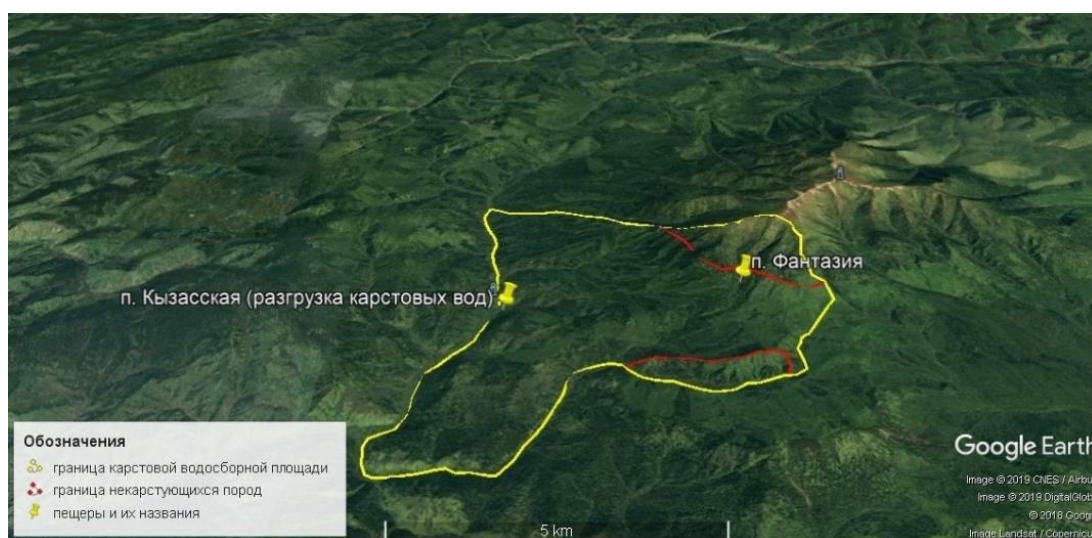


Рис. 2. Карстовая водосборная площадь юго-западного сектора горы Патын (Патынский подрайон)

Fig. 2. The karst catchment area of the southwest sector of Mount Patyn (the Patynsky subdistrict)

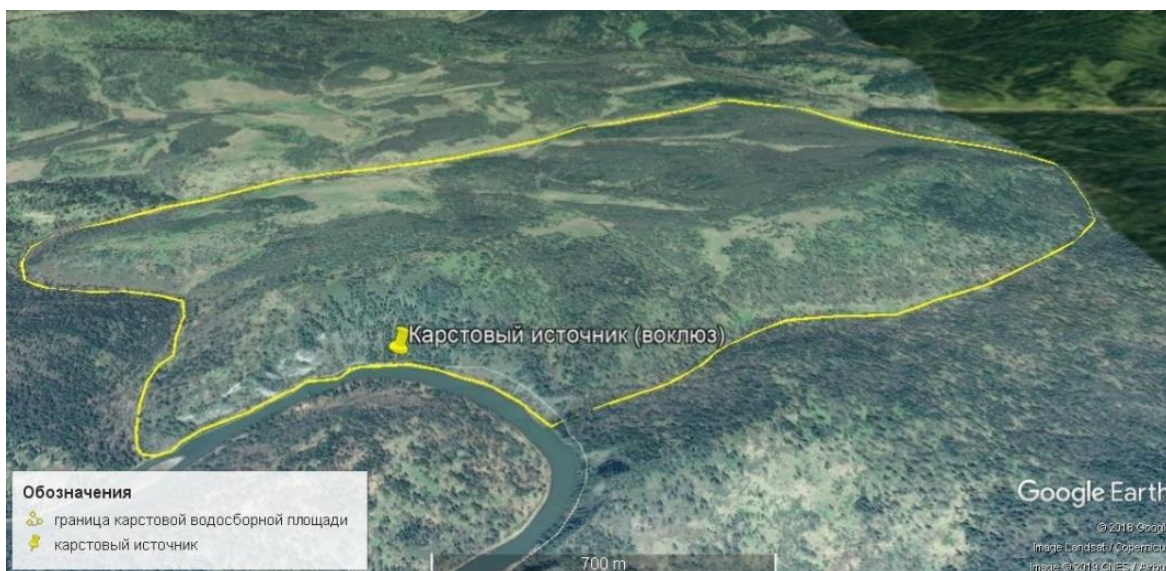


Рис. 3. Карстовая водосборная площадь массива над пещерой Грандиозная (Карчитский участок)

Fig. 3. The karst catchment area of the massif over a cave Grandiose (the Karchitsky site)

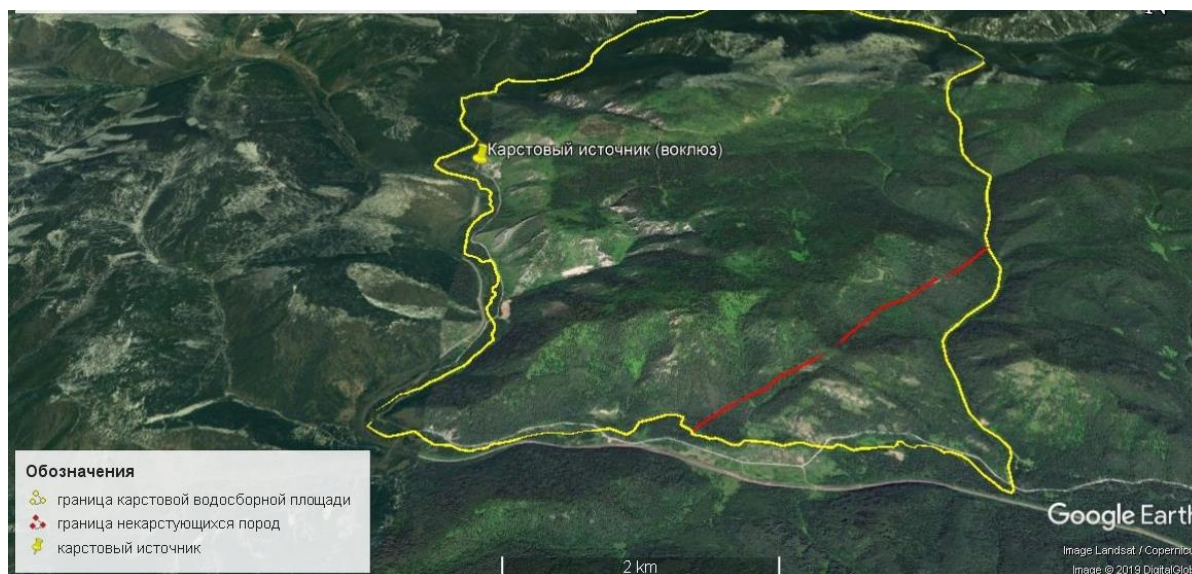


Рис. 4. Карстовая водосборная площадь плато Чизень (Портал-Хабзасский участок)

Fig. 4. The karst catchment area of the plateau Chizen (The Portal-Habzassky site)

При количественных расчетах скорости подземной карстовой денудации по формулам Ж. Корбеля и М. Пулины необходимо располагать данными о высоте слоя подземного стока воды в дм, модуле подземного стока в л/с·км² и содержании CaCO₃ в весовых единицах на объем (мг/дм³).

Данные о расходе питающегося подземными карстовыми водами поверхностного водотока (включоза) и содержании CaCO₃ могут быть получены путем замеров расхода в полевых условиях и отбора проб воды на анализ. Необходимые полевые работы были проведены автором и его коллегами спелеологами (Величко С.В.) во время исследовательских экспедиций на территории изучаемых карстовых массивов летом-осенью 2017 г. во время межени (табл. 1). Как видно из табл. 1, расход карстовых источников характеризует их по дебиту как «большие» (0.1–1 м³/с) и «очень большие» (1–100 м³/с), согласно классификации О.А. Мейнцера и Г.А. Максимовича [1963].

Таблица 1
Table 1Данные о расходе карстовых источников
Data on an expense of karst springs

Карстовый источник	Карстовый массив (участок)	Расход, м ³ /с
Пещера Кызасская	Юго-западный сектор г. Патын (Патынский подрайон)	1.47
Воклюз из под п. Грандиозная	Карстовый массив над п. Грандиозная (Карчитский участок)	0.15
Воклюз из под г. Паук	Плато Чизень (Портал-Хабзасский участок)	1.05

Во время камеральной обработки результатов в химико-аналитической лаборатории ИМКЭС СО РАН (г. Томск) определена общая жесткость и водородный показатель в отобранных пробах (табл. 2). Общая жесткость определялась на основе суммы жесткости ионов Ca^{2+} и Mg^{2+} . На основании показателей жесткости воды автором рассчитано содержание CaCO_3 в растворенном виде в исследуемых пробах. Для этого необходимо перевести российские градусы жесткости (Ж°) в миллионные доли (ppm).

Таблица 2
Table 2Минерализация и кислотность карстовых источников
Mineralization and acidity of karst springs

Карстовый источник	Карстовый массив	Жесткость, градусы	Жесткость, ppm	Содержание CaCO_3 , мг/дм ³	Водородный показатель, pH
Пещера Кызасская	Юго-западный сектор г. Патын (Патынский подрайон)	2.6	130.1	130.1	7.53
Воклюз из под п. Грандиозная	Карстовый массив над п. Грандиозная (Карчитский участок)	4.6	230.2	230.2	8.19
Воклюз из под г. Паук	Плато Чизень (Портал-Хабзасский участок)	3.42	170.1	170.1	7.81

Анализируя полученные данные (см. табл. 2), мы видим, что для всех источников характерны слабощелочные растворы [Бейтс, 1972]. Данный факт может говорить о том, что поверхностные инфильтрационные воды, проходя через подзолистые и дерново-подзолистые почвы, дают кислую реакцию с повышенной агрессивностью, что способствует растворению подстилающих карбонатов. Непосредственно в самих расчетах химической денудации водородный показатель не участвует.

Согласно полевым и лабораторным исследованиям, самая низкая минерализация наблюдается у карстового источника Патынского подрайона. В пользу этого может говорить тот факт, что большинство карстующихся пород участка представлены мраморами и мраморизованными известняками Синийского комплекса Енисейской свиты. Исходя из этого скорость растворения мраморов намного ниже, чем у массивных тонкослоистых нижнекембрийских известняков Усинской свиты, которые характерны для Карчитского участка, показатель содержания CaCO_3 (мг/дм³) которого более чем в 1.5 раза выше. Благодаря более высокой растворимости, водородный показатель, соответственно, будет выше, чем у пород Синийского комплекса. Таким образом, высокая минерализация и водородный показатель находятся в близкой зависимости друг от друга. Промежуточное значение занимает Портал-Хабзасский карстовый участок, частично сложенный Синийскими карбонатами. [Геологическая карта ..., 2019; Государственная геологическая карта ..., 2019].

Для расчета модуля подземного стока необходимо установить площадь карстового водосбора исследуемого участка. Прежде чем рассчитать площадь водосбора, необходимо определить тип подземного стока по направлению, который может быть однонаправленным (карстовые воды выходят на поверхность на периферии массива строго с одной стороны), двунаправленным (воды выходят в противоположные стороны) и центробежным (воды выходят по всей периферии массива) [Максимович, 1963]. Это можно установить непосредственно путем поисковых маршрутов по долинам, которые пройдены автором и его коллегами спелеологами (С.В. Величко, А.В. Данилов), ограничивающих изучаемые карстовые массивы, а также при помощи поиска и анализа данных ДЗЗ. При хорошем разрешении на зимних снимках карстовые источники могут проявляться в виде участков незамерзающей воды в русле магистральных рек, на летних снимках карстовые источники могут быть идентифицированы визуально при хорошем разрешении. Определение типа подземного стока важно в связи с тем, что если карстовые воды разгружаются в разных точках периферии массива, то мы можем говорить о присутствии подземного водораздела, который не совпадает с поверхностным, поскольку потоки карстовых вод контролируются местной тектоникой. Таким образом, площадь карстового водосбора будет для каждого источника своя. Четкая методика для установления точной границы подземного карстового водораздела в литературе отсутствует. В связи с этим данный вопрос остаётся открытым и не решенным в инженерном карстоведении. Используя поисковые методы по долинам магистральных рек, ограничивающих массив, и метод анализа данных ДЗЗ, автором было установлено, что для всех трех исследуемых карстовых массивов характерен одно-сторонний тип стока.

При помощи цифровых 3D-моделей рельефа программы Google Earth Pro подсчитана карстовая водосборная площадь для изучаемых массивов (см. рис. 2–4, табл. 3).

Таблица 3
Table 3

Площадь карстовых водосборов
Area of karst reservoirs

Карстовый массив (участок)	Площадь карстового водосбора, км ²
Юго-западный сектор г. Патын (Патынский подрайон)	35.58
Карстовый массив над п. Грандиозная (Карчитский участок)	5.90
Плато Чизень (Портал-Хабзасский участок)	41.94

Полученные значения площадей карстовых водосборов позволяют судить об отношении к площади всего карстового участка. Для Портал-Хабзасского участка это значение равно 1/4, для карчитского – 1/17, площадь карстового участка юго-западного сектора горы Патын составляет 1/3 от площади всего Патынского подрайона.

Используя формулы Л.К. Давыдова и др. [1973], мы рассчитываем модуль подземного стока для каждого района по формуле (1):

$$M = 10^3 \frac{Q}{F} \tag{1}$$

где Q – расход воды в м³/с, F – площадь водосбора в км², M – модуль стока л/с×км².

Показатель модуля стока в дальнейшем необходим для определения слоя подземного стока за год по формуле (2) Л.К. Давыдова и др. [1973]:

$$Y = 31.54 \times M \tag{2}$$

где M – модуль стока в л/с×км², Y – слой стока в мм. Получаем следующие результаты (табл. 4).

Таблица 4
Table 4Модуль и слой подземного стока
Module and layer of an underground drain

Карстовый массив (участок)	Модуль подземного стока (л/с × км ²)	Слой подземного стока за год (дм)
Юго-западный сектор г. Патын (Патынский подрайон)	41.31	13.02
Карстовый массив над п. Грандиозная (Карчитский участок)	25.42	8.01
Плато Чизень (Портал-Хабзасский участок)	25.03	7.89

Высокие показатели модуля и слоя подземного стока для всех трех карстовых массивов позволяют судить о существовании в пределах каждого развитой сети карстовых каналов и пустот.

Определив все необходимые показатели для расчета подземной химической денудации, мы можем рассчитать ее по формулам, которые предложили Ж. Корбель и М. Пулина. Расчет по формуле (3) Ж. Корбеля [Corbel, 1959]:

$$X = 4 \times E \times T \times n/100 \quad (3)$$

где E – высота слоя стекающей воды, дм; T – минерализация карстового источника в пересчете на CaCO_3 в мг/дм^3 ; n – отношение площади карстующихся пород ко всей площади; X – величина денудации в $\text{м}^3/\text{год} \times \text{км}^2$, что соответствует толщине слоя снесенного вещества, в мм за тысячелетие. Коэффициент $4/100$ необходим для пересчета весовых единиц, в которых выражено T , в объемные через величину удельного веса CaCO_3 (2.5) и для согласования всех остальных метрических единиц измерения.

Польский исследователь М. Пулина модифицировал формулу Корбеля, введя значение модуля стока вместо слоя стока стекающей воды. После преобразования формула (4) получила следующий вид [Pulina, 1968]:

$$D = 0.0126 \times T \times V \quad (4)$$

где T – минерализация карстового источника в пересчете на CaCO_3 , мг/дм^3 , V – модуль стока в $\text{л/с} \times \text{км}^2$, D – химическая денудация $\text{м}^3/\text{год} \times \text{км}^2$ или $\text{мм}/1000$ лет, коэффициент 0.0126 учитывает удельный вес CaCO_3 (2.5) для перевода весовых единиц (T , мг/дм^3) в объемные (как и $4/100$ в формуле Ж. Корбеля).

Подводя итог по всем расчетам, мы имеем следующие показатели подземной химической денудации (табл. 5).

Таблица 5
Table 5Показатели скорости подземной химической денудации
Indexes of speed of an underground chemical denudation

Карстовый массив	По Корбелю ($\text{м}^3/\text{год} \times \text{км}^2$ или $\text{мм}/1000$ лет)	По Пулине ($\text{м}^3/\text{год} \times \text{км}^2$ или $\text{мм}/1000$ лет)
Юго-западный сектор г. Патын (Патынский подрайон)	58.94	58.91
Карстовый массив над п. Грандиозная (Карчитский участок)	73.75	73.73
Плато Чизень (Портал-Хабзасский участок)	49.92	49.89

Анализ показывает (см. табл. 5), что полученные скорости подземной химической денудации имеют близкие друг к другу значения, что обуславливается схожей физико-географической и геологической обстановкой.

Рассчитав количество растворенной породы, выносимой подземными водами, мы можем определить активность карстового процесса изучаемой территории по формуле (5) Н.В. Родионова [Трофимов, Калинин, 2013]:

$$A = \frac{v}{V} \times 100 \tag{5}$$

где v – объём растворенной горной породы в $\text{м}^3/\text{год} \times \text{км}^2$ или $\text{мм}/1000$ лет, V – средняя величина объёма породы в м^3 , A – активность карстового процесса за 1000 лет в %. Прежде чем произвести расчеты по формуле Н.В. Родионова, необходимо выяснить среднюю величину объёма карстующихся пород, слагающих исследуемый участок по формуле (6):

$$V = S \times H \tag{6}$$

где S – водосборная площадь карстующегося массива, в м^2 , H – средняя мощность карстующихся пород относительно базиса эрозии, в м. Последнюю величину мы получаем исходя из анализа высоты карстового массива, в пределах которой карстовые процессы протекают наиболее интенсивно, выражаясь в виде типичных поверхностных форм карстового рельефа (воронки, поноры, сухие лога и т. д.). Таким образом, мы определяем среднее превышение карстового массива над базисом эрозии, которое отражает среднюю мощность карстующихся пород (табл. 6).

Таблица 6
Table 6

Активность карстовых процессов изучаемых районов
Activity of karst processes of the studied areas

Карстовый массив	Объём растворенной горной породы (v), в $\text{м}^3/\text{год} \times \text{км}^2$ или $\text{мм}/1000$ лет (по Корбелю)	Средняя величина объёма (V) карстующихся пород в м^3	Активность карстового процесса (A) за 1000 лет в %
Юго-западный сектор г. Патын (Патынский подрайон)	58.94	9291000	0.0006
Карстовый массив над п. Грандиозная (Карчитский участок)	73.75	767000	0.009
Плато Чизень (Портал-Хабзасский участок)	49.92	9780000	0.0005

По величине активности карста (в процентах за тысячелетие) Г.А. Максимович делит карстовые районы на следующие классы (табл. 7). Исходя из данной классификации было определено, что для Патынского карстового подрайона и Портал-Хабзасского карстового участка характерна «очень малая» степень активности карстовых процессов. Для Карчитского участка активность карстовых процессов на порядок выше и находится в пограничном состоянии между классами активности «малая» и «значительная».

Таблица 7
Table 7

Классификация карстовых районов по степени активности карстового процесса по Г.А. Максимовичу [1963]
Classification of karst areas by a degree of activity of karst process by G.A. Maksimovich [1963]

Класс активности карста	Показатель современной активности карста, A
1 – Чрезвычайная	> 10
2 – Очень большая	10–1
3 – Большая	1–0.1
4 – Значительная	0.1–0.01
5 – Малая	0.01–0.001
6 – Очень малая	0.001–0.0001
7 – Незначительная	< 0.0001



Выводы

Интенсивность карстового процесса является прямым индикатором физико-географической и геологической обстановки в районе. Анализируя полученные скорости подземной химической денудации для трех ключевых карстовых участков, мы видим, что показатели денудации изменяются в небольших пределах. Это, прежде всего, связано с тем, что все 3 участка сложены Синийскими и нижнекембрийскими карбонатами, которые находятся на одном и том же гипсометрическом уровне (400–900 м), для которого характерна избыточно-влажная климатическая фация, где господствует черневая и темнохвойная тайга с подстилающими подзолистыми и дерново-подзолистыми почвами.

Полученные значения от 49.92 до $73.75 \text{ м}^3/\text{год} \times \text{км}^2$ или $\text{мм}/1000$ лет вполне характерны для данного типа климата. Это косвенно подтверждается в сравнении с данными, полученными Ж. Корбелем в других карстовых областях умеренного климатического пояса, таких как Аляска, Канадские Кордильеры, Скандинавия и др. Сравнивая полученные показатели карбонатного карста с тропическими областями, где скорости карстовой денудации могут быть более $100 \text{ м}^3/\text{год} \times \text{км}^2$ или $\text{мм}/1000$ лет, мы можем сделать вывод, что скорости химической денудации, которые во многом являются отражением температуры и влажности климата, также контролируются законом широтной зональности. Одновременно с этим скорость карстовых процессов во многом зависит от высотного пояса, в котором они развиваются. Для Алатауско-Шорского нагорья наиболее высокие скорости карстовой денудации характерны для зоны тайги на высотах до 1000 м. Хотя опыты по определению скоростей химической денудации для более высоких высотных поясов Кузнецкого Алатау и Горной Шории не проводились, учитывая физико-географические условия, в которых здесь развивается карст, мы можем предполагать, что интенсивность карстовой денудации на высотах более 1000 м будет намного ниже благодаря более низким температурам и преобладающим типом твердых осадков.

Многочисленные мезоформы (диаметр и глубина от 5 до 50 м) карстового рельефа, выраженные эрозионно-коррозионными, провальными, суффозионными карстовыми воронками, понорами и сухими логами, наиболее характерны для диапазонов скоростей химической денудации от 20 до $80 \text{ м}^3/\text{год} \times \text{км}^2$ или $\text{мм}/1000$ лет. Данный факт подтверждается исследованиями по определению скоростей карста в других карстовых районах гор Южной Сибири со схожими физико-географическими и геологическими условиями, где скорость карстовых процессов находится в аналогичных пределах (Горный Алтай, Восточные Саяны, Хамар-Дабан). Более низкие показатели выщелачивания карбонатной породы (меньше $20 \text{ м}^3/\text{год} \times \text{км}^2$ или $\text{мм}/1000$ лет) будут выражаться в рельефе преимущественно микроформами (диаметр и глубина менее 5 м).

Выявляя локальные особенности для трех исследуемых районов, мы можем отметить, что наиболее высокие скорости подземной химической денудации характерны для Карчитского карстового участка ($73.75 \text{ м}^3/\text{год} \times \text{км}^2$ или $\text{мм}/1000$ лет). Это может быть обусловлено тем, что участок сложен более растворимыми, массивными нижнекембрийскими известняками Усинской свиты в сравнении с Синийскими мраморами Енисейской свиты, которыми преимущественно сложен Патынский подрайон и частично Портал-Хабзасский участок. Высокий показатель скорости денудации Карчитского участка также обусловлен наименьшей (в 6–7 раз) в сравнении с остальными двумя участками площадью карстового водосбора и крупным для такой площади карстовым источником (расход $0.15 \text{ м}^3/\text{с}$).

Исходя из анализа, проведенного автором во время полевых исследований морфологии форм подземного карстового рельефа изучаемых районов, можно установить, что подземный карст на данной территории, вероятно, образовался в раннечетвертичное время, но высокие скорости химической денудации на современном этапе позволяют судить, что карст имеет «омоложенный» характер благодаря активным неотектоническим движе-

ниям в современный период, свидетельством этого могут служить карстовые источники подвешенного типа, отстающие от глубинной эрозии базисных рек.

Низкие показатели активности карстового процесса (табл. 6, 7), которые, согласно классификации Г.А. Максимовича, имеют значение как «очень малая» (Патынский, Портал-Хабзасский участки) и «малая» (Карчитский участок), могут говорить о том, что данные закарстованные территории достаточно устойчивы для ведения хозяйственной деятельности.

В заключение необходимо отметить, что химическая денудация – это условная расчетная величина, показывающая, на сколько мм снизилась земная поверхность, если бы эти процессы развивались равномерно в течение 1000 лет. В этом и состоит значение показателей денудации как сравнительной величины. В связи с этим показатели химической денудации отражают интенсивность карстовых процессов только на современном этапе. В природе химическая денудация развивается неравномерно, поэтому нельзя строго судить о результатах сравнительного анализа скоростей карстовых процессов, которые были получены разными методами. Между данными величинами можно установить более или менее тесные корреляционные связи.

Список литературы

1. Бейтс Р. 1972. Определение pH. Теория и практика. Изд. 2. Л., Изд-во Химия, 400 с.
2. Беляк В.И. 1968. Количественная оценка карстовой денудации известняков Восточного Саяна. Тр. Забайк. фл-а ГО СССР, 3: 247–249.
3. Гвоздецкий Н.А. 1988. Карстовые ландшафты. М., Изд-во МГУ, 112 с.
4. Гвоздецкий Н.А. 1970. Применение количественных методов для определения скорости карстовой денудации. Вестник Московского Университета. Серия: География, 4: 19–23.
5. Геологическая карта СССР масштаба 1:200000, серия Минусинская, лист N-45 XXIV. База данных государственных геологических карт. Электронный ресурс. URL: <http://webmapget.vsegei.ru/index.html> (дата обращения: 18 марта 2019).
6. Геоморфологическая схема участка N-45-XXIX. База данных государственных геологических карт. Электронный ресурс. URL: <http://webmapget.vsegei.ru/index.html> (дата обращения: 25 марта 2019).
7. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1:20000, Кузбасская серия, N-45-XXIX (Усть-Кабырза). База данных государственных геологических карт. Электронный ресурс. URL: <http://webmapget.vsegei.ru/index.html> (дата обращения: 19 марта 2019).
8. Давыдов Л.К., Дмитриева А.А., Конкина Н.Г. 1973. Общая гидрология. Л., Гидрометиздат, 463 с.
9. Дублянский В.Н., Печеркин А.И., Кожевников В.Н., Кутепов В.Н. 1984. Химическая денудация карстовых регионов и методы ее определения. В кн.: О передовом опыте в изучении карстовых процессов. М., ЦПНТГО: 6.
10. Евсеева Н.С., Осинцева Н.В. 2013. Экологическая геоморфология: учебное пособие. Томск, Издательство Томского государственного университета, 230 с.
12. Ковалёв Р.А. 2018. Скорость и активность карстовых процессов на территории Горного Алтая на примере карстового участка горы Кокуя. Труды шестой международной научно-практической конференции. М., Буки-Веди: 154–161.
13. Ковалев Р.В., Волковинцер В.И. 1968. Почвенный покров Горно-Алтайской автономной области и пути его рационального использования. В кн.: Вопросы развития сельского хозяйства Горного Алтая. Новосибирск: 73–74.
14. Костарев В.П. 2015. Это нужно знать, приступая к инженерно-геологическим изысканиям на закарстованных территориях. Материалы Международного Симпозиума. Пермь, 336 с.
15. Крапивкина Э.Д. 2009. Неморальные реликты во флоре черневой тайги Горной Шории. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 229 с.
16. Кузьмин С.Б., Плюснин В.М. 2009. Опасные геоморфологические процессы и риск природопользования. Новосибирск, Академическое изд-во «Гео», 195 с.
17. Максимович Г.А. 1963. Основы карстологии: Вопросы морфологии карста, спелеологии и гидрогеологии карста. Пермь, Пермское книжное издательство, 445 с.



18. Максимович Г.А. 1969. Основы карстования: Вопросы гидрогеологии карста, реки и озёра карстовых районов, карст мела, гидротермокарст. Пермь, Пермское книжное издательство, 525 с.
19. Маринин А.М. 1990. Карст и пещеры Алтая. Новосибирск, Изд-во НГПИ, 148 с.
21. Салаиро-Кузнецкая спелеологическая провинция. Информационно-поисковая система «Пещеры». Электронный ресурс. URL: <https://speleoatlas.ru/caves/> (дата обращения: 10 апреля 2019).
11. Трофимов В.Т., Калинин Э.В. 2013. Инженерная геология России. Инженерная геодинамика территории России. М., Издательский дом КДУ, 2, 816 с.
22. Трофимова Е.В. 2006. Карстовая денудация на территории Сибири и Дальнего Востока: особенности современного развития. Геоморфология, 3: 78–84.
20. Чернов Г.А., Вдовин В.В., Окишев П.А., Петкевич М.В., Мистрюков А.А., Зяткова Л.К., Миляева Л.С. 1988. Рельеф Алтае-Саянской горной области. Новосибирск, Наука, 206 с.
23. Corbel J. 1959. Erosion en terrain calcaire. Annales de geographie, 366: 97–120.
24. Corbel J. 1957. Les karsts du nord-ouest de l'Europe et de quelques regions de comparaison. Etude sur le role du climat dans l'erosion des calcaires. Revue Geogr. Lyon, publ. Hors serie., 541 p.
25. Pulina M. 1968. The Eastern Siberian Karst. Geographia Polonica, 14: 109–116.

References

1. Bates R. 1972. Definition pH. Theory and practice. Prod. 2. Leningrad, Chemistry Publishing house, 400 p. (in Russian).
2. Belyak V.I. 1968. Kolichestvennaya otsenka karstovoy denudatsii izvestnyakov Vostochnogo Sayana [Quantitative assessment of a karst denudation of limestones of East Sayan]. Tr. Zabayk. fl. GO USSR, 3: 247–249.
3. Gvozdetsky N.A. 1988. Karstovyye landshafty [Karst landscapes]. Moscow, MSU Publishing house, 112 p.
4. Gvozdetsky N.A. 1970. Application of the quantitative methods for determination of speed of a karst denudation. Moscow University Bulletin. Geography, 4: 19–23 (in Russian).
5. Geological map of the USSR mastshaba 1:200000, Minusinsk series, sheet N-45 XXIV. Database of the state geological maps. Electronic resource. Available at: <http://webmapget.vsegei.ru/index.html> (accessed: 18 March 2019).
6. Geomorphological scheme of the site N-45-XXIX. Database of the state geological maps. Electronic resource. Available at: <http://webmapget.vsegei.ru/index.html> (accessed: 25 March 2019).
7. State geological map of the Russian Federation of scale 1:20000, Kuzbass series, N-45-XXIX (Ust-Kabyrz). Database of the state geological maps. Electronic resource. Available at: <http://webmapget.vsegei.ru/index.html> (accessed: 19 March 2019).
8. Davydov L.K., Dmitriyeva A.A., Konkina N.G. 1973. Obshchaya gidrologiya [General hydrology]. Leningrad, Gidrometizdat, 463 p.
9. Dublyanskiy V.N., Pecherkin A.I., Kozhevnikov V.N., Kutepov V.N. 1984. Khimicheskaya denudatsiya karstovykh regionov i metody ee opredeleniya [Chemical denudation of karst regions and methods of its definition]. V kn.: O peredovom opyte v izuchenii karstovykh protsessov [About the best practices in studying of karst processes]. Moscow, ZPNTGO: 6.
10. Evseeva N.S., Osintseva N.V. 2013. Ecological geomorphology: manual. Tomsk, Publishing house Tomskiy state university, 230 p. (in Russian).
12. Kovalev R.A. 2018. Speed and activity of karst processes in the territory of Mountain Altai on the example of the karst site of the mountain Kokuya. Proceedings of the Sixth International Scientific and Practical Conference. Moscow, Buki-Vedi: 154–161 (in Russian).
13. Kovalev R.V., Volkovintser V.I. 1968. Pochvennyy pokrov Gorno-Altayskoy avtonomnoy oblasti i puti ego ratsionalnogo ispolzovaniya [Soil cover of the Gorno-Altaysk autonomous region and way of its rational use]. V kn.: Voprosy razvitiya selskogo khozyaystva Gornogo Altaya [Issues of development of agriculture of Mountain Altai]. Novosibirsk: 73–74.
14. Kostarev V.P. 2015. It needs to be known, starting engineering-geological researches in carstified territories. Materials of the International Symposium. Perm, 336 p. (in Russian).
15. Krapivkina E.D. 2009. Not moral relicts in flora of a dark taiga of Gornaya Shoriya. Novosibirsk, Siberian Branch of the Russian Academy of Science Publishing house, 229 p. (in Russian).

16. Kuzmin S.B., Plyusnin V.M. 2009. Dangerous geomorphological processes and risk of environmental management. Novosibirsk, Academic publishing house "Geo", 195 p. (in Russian).
17. Maksimovich G.A. 1963. Osnovy karstovedeniya: Voprosy morfologii karsta, speleologii i gidrogeologii karsta [Karst bases: Questions of morphology of a karst, speleology and hydrogeology of a karst]. Perm, Perm book publishing house, 445 p.
18. Maksimovich G.A. 1969. Osnovy karstovedeniya. Voprosy gidrogeologii karsta. reki i ozera karstovykh rayonov. karst mela. gidrotermokarst [Karst bases. Questions of hydrogeology of a karst, river and lakes of karst areas, chalk karst, hydrothermokarst]. Perm, Perm book publishing house, 525 p.
19. Marinin A.M. 1990. Karst i peshchery Altaya [Karst and caves of Altai]. Novosibirsk, NGPI Publishing house, 148 p.
21. Salairo-Kuznetsky speleological province. Caves information retrieval system. Electronic resource. Available at: <https://speleoatlas.ru/caves/> (accessed: 19 April 2019).
11. Trofimov V.T., Kalinin E.V. 2013. Engineering geology of Russia. Engineering geodynamics of the territory of Russia. Moscow, Prod. house of KDU, 2, 816 p. (in Russian).
22. Trofimova E.V. 2006. A karst denudation in the territory of Siberia and the Far East: features of the modern development. *Geomorphology*, 3: 78–84 (in Russian).
20. Chernov G.A., Vdovin V.V., Okishev P.A., Petkevich M.V., Mistryukov A.A., Zyatko-va L.K., Milyayeva L.S. 1988. Relyef Altaye-Sayanskoy gornoy oblasti [Relief of the Altai-Sayansk mountain region]. Novosibirsk, Nauka, 206 p.
23. Corbel J. 1959. Erosion en terrain calcaire. *Annales de geographie*, 366: 97–120.
24. Corbel J. 1957. Les karsts du nord-ouest de l'Europe et de quelques regions de comparasion. E'tude sur le role du climat dans l'erosion des calcaries. *Revue Geogr. Lyon, publ. Hors serie.*, 541 p.
25. Pulina M. 1968. The Eastern Siberian Karst. *Geographia Polonica*, 14: 109–116.

Ссылка для цитирования статьи

Reference to article

Ковалёв Р.А. 2019. Скорость подземной химической денудации и активность карстовых процессов Мрасского и Кузнецкого карстовых районов (Алатауско-Шорское нагорье) на примере ключевых карстовых участков. *Научные ведомости Белгородского государственного университета. Серия: Естественные науки.* 43(4): 386–399. DOI 10.18413/2075-4671-2019-43-4-386-399

Kovalev R.A. 2019. Speed of the underground chemical denudation and activity of karst processes of Mrassky and Kuznetsk karst districts (Alatausko-Shorskoe uplands) on the example of key karst sites. *Belgorod State University Scientific Bulletin. Natural Sciences Series.* 43(4): 386–399 (in Russian). DOI 10.18413/2075-4671-2019-43-4-386-399