



**А.Б. Климчук, Е.И. Тимохина, Г.Н. Амеличев, Ю.В. Дублянський, М. Штаубвассер**

## **U/Th датирование спелеотем карстовых полостей юго-западной части Внутренней гряды Горного Крыма и определение возраста и динамики развития рельефа**

Климчук А.Б., Тимохина Е.И., Амеличев Г.Н., Дублянський Ю.В., Штаубвассер М. U/Th датирование спелеотем карстовых полостей юго-западной части Внутренней гряды Горного Крыма и определение возраста и динамики развития рельефа // Спелеология и карстология - № 7. – Симферополь. – 2011. С. 29-39.

**Резюме:** Абсолютное датирование по U/Th соотношениям различных типов кальцитовых спелеотем пещер юго-западной части Внутренней гряды Горного Крыма позволило получить возрастную привязку периода завершения гипогенного развития карстовых систем и привязку геоморфологических обстановок, соответствующих началу и оформлению выражения палеоценового сегмента гряды в рельефе, а также оценить скорость денудационного углубления южной продольной депрессии (ЮПД). Установлено, что основные элементы рельефа этой полосы Предгорья оформились в течение второй половины среднего плейстоцена, что изменяет представления о возрасте рельефа региона в сторону существенного омоложения. Определена скорость денудационного углубления депрессии за последние 250 тыс. лет, составляющая 1,36 ( $\pm 0,08$ ) мм/год. Для интервалов второй половины среднего плейстоцена (250 – 130 тыс. лет) и позднего плейстоцена-голоцена (последние 130 тыс. лет) скорость денудации определена, соответственно, в 0,9 и 1,8 мм/год, хотя со значительно более высокой погрешностью ( $\pm 0,3$  мм/год). Увеличение скорости денудационного углубления ЮПД в позднплейстоцен-голоценовое время по сравнению со второй половиной среднего плейстоцена является показателем соответствующего увеличения скорости поднятия.

**Ключевые слова:** карст, гипогенный спелеогенез, U/Th датирование спелеотем, возраст рельефа, скорость денудации, Внутренняя гряда, Горный Крым.

Климчук О.Б., Тимохіна Е.І., Амелічев Г.М., Дублянський Ю.В., Штаубвассер М. U/Th датування спелеотем карстових порожнин південно-західної частини Внутрішнього пасма Гірського Криму та визначення віку і динаміки розвитку рельєфу // Спелеологія і карстологія - № 7. – Сімферополь. – 2011. С. 29-39.

**Резюме:** Абсолютне датування за U/Th співвідношеннями різних типів кальцитових спелеотем карстових порожнин південно-західної частини Внутрішнього пасма Гірського Криму дозволило одержати вікову прив'язку періоду завершення гіпогенного розвитку карстових систем та прив'язку геоморфологічних обстановок, що відповідають початку та оформленню вираження палеоценового сегменту пасма у рельєфі, а також оцінити швидкість денудацийного поглиблення південної поздовжньої депресії (ППД). Встановлено, що основні елементи рельєфу цієї полоси Передгір'я сформовані протягом другої половини середнього плейстоцену, що змінює уявлення про вік рельєфу регіону у бік суттєвого омоложення. Визначена швидкість денудацийного поглиблення депресії протягом останніх 250 тис. років, що складає 1,36 ( $\pm 0,08$ ) мм/рік. Для інтервалів другої половини середнього плейстоцену (250-130 тис. років) та пізнього плейстоцену-голоцену (останні 130 тис. років) швидкість денудатії визначена, відповідно, у 0,9 та 1,8 мм/рік, проте із значно більшою похибкою ( $\pm 0,3$  мм/рік). Зростання швидкості денудацийного поглиблення ППД у пізньоплейстоцен-голоценовий час у порівнянні із другою половиною середнього плейстоцену є показником відповідного зростання швидкості підняття.

**Ключові слова:** карст, гіпогенний спелеогенез, U/Th датування спелеотем, вік рельєфу, швидкість денудатії, Внутрішнє пасмо, Гірський Крим.

Klimchouk A.B., Tymokhina E.I., Amelichev G.M., Dublyansky Yu.V., Staubwasser M. U/Th dating of speleothems of karst caves in the south-west part of the Inner Range of the Mountainous Crimea and determination of relief age and its development dynamics // Speleology and Karstology - № 7. – Simferopol. – 2011. P. 29-39.

**Abstract:** U/Th dating of calcite speleothems of karst cavities in the south-west part of the Inner Range of the Mountainous Crimea permitted to establish age constrains for the period of termination of the hypogenic development of karst systems and

for geomorphologic settings corresponding to incipient and mature expression of the Paleocene segment of the range in relief. This also allowed evaluating rates of denudational deepening of the southern longitudinal depression (SLD). It is found that the main elements of the relief in this belt of the fore-mountains had been formed during the second half of Middle Pleistocene, which changes substantially a concept of the age of the relief for the region toward younger values. The rate of denudational deepening of the depression is determined to be 1.36 ( $\pm 0,08$ ) mm/a. For the time intervals of the second half of Middle Pleistocene (250 – 130 ka) and Late Pleistocene – Holocene (last 130 ka) the rates are, respectively, 0.9 and 1.8 mm/a, although determined with much higher error ( $\pm 0,3$  mm/a). The increase in the rates of the denudational deepening of the SLD during Late Pleistocene – Holocene indicates the respective increase in the uplift rates.

**Keywords:** karst, hypogenic speleogenesis, U/Th dating of speleothems, age of relief, denudation rate, Inner Range, Mountainous Crimea.

## ВВЕДЕНИЕ

Ключевые характеристики карстовых каналово-полостных систем (их структура, морфология, вторичные отложения, проч.) являются индикаторами определенных геоморфологических, гидрогеологических и геохимических условий и процессов, поэтому карстологические и спелеогенетические исследования могут давать ценную информацию об эволюции различных условий геологической среды. Хорошая сохранность таких характеристик-индикаторов (в отличие от поверхностных объектов) обеспечивается в течение геологически длительных периодов после вывода спелеологических объектов в реликтовое или ископаемое состояния. Современный уровень понимания процессов и закономерностей эволюции карста и спелеогенеза (Klimchouk et al., 2000, 2007; Ford, Williams, 2007; Palmer, 2007), а также разнообразные и богатые возможности относительного и абсолютного датирования пещерных форм и отложений, делают «карстовые архивы» одними из наиболее информативных среди других типов континентальных летописей (Lauritzen, 1996), чем определяется большое значение карстолого-спелеологических исследований для палеореконструкций.

Потенциал палеореконструкций по карстового-спелеологическим данным во многом зависит от генезиса карста данной территории. Генетические типы карста определяются генезисом и структурно-функциональными особенностями каналово-полостных систем, формирующихся в различных обстановках. Различаются три основных генетических типа карста (спелеогенеза) верхней части земной коры: прибрежно-островной, гипогенный и эпигенный (Климчук, 2010). Гипогенный и эпигенный типы карста характеризуются различными генетическими и эволюционными взаимоотношениями с земной поверхностью.

Карст Внутренней гряды традиционно рассматривался как эпигенный (гипергенный), т.е. формирующийся за счет местного поверхностного питания и нисходящей фильтрации в условиях экспонирования известняков на дневную поверхность и их вскрытия долинами (Львова, Мелешин, 1970; Душевский, 1970, Душевский, 1971, 1978, 1987; Душевский, Лысенко, 1982, Дублянский, Ломаев, 1980; Дублянский, Дублянская, 1996, и др.). Эпигенная генетическая модель в условиях Предгорья подразумевает, что карст развивался в геоморфологических условиях, близких к современным,

т.е. карстопроявления не содержат информацию о предшествующих этапах эволюции региона.

Закарстованность известняков Внутренней гряды выражена, главным образом, многочисленными гротами, нишами и прочими скульптурными формами растворения в обрывах куэст, зонами кавернозности и изолированными камерами, а также отдельными карстовыми полостями каналового типа, значительными по размерам. Поверхностные карстопроявления на «спинах» куэстовых гряд практически отсутствуют, за исключением мелких скульптурных форм на обнаженных поверхностях известняков.

Проведенными в последние годы специальными исследованиями установлено гипогенное происхождение карстовых полостей Внутренней гряды (Климчук, Амеличев, Тимохина, 2009, 2010; Климчук, Тимохина, 2011), т.е. их формирование в закрытых гидрогеологических условиях напорного водоносного комплекса с относительно низкодинамичной средой, при взаимодействии восходящих трещинно-жильных вод глубокой циркуляции с пластовыми водами более мелкой системы стока, при большой роли конвективной циркуляции в морфогенезе образующихся полостей (рис. 1). При вскрытии карстующейся толщи поверхностной денудацией и ее дренировании гипогенные карстовые полости переходят в реликтовое состояние. Боковое раскрытие полостей при гравитационно-блоковом отступании куэстовых обрывов экспонирует в них разнообразные формы гипогенной карстовой скульптуры, впоследствии уничтожаемые поверхностным выветриванием.

Возможные в условиях данного участка химические механизмы гипогенного спелеогенеза включают «коррозию смешивания» (возобновление/возрастание агрессивности при смешивании вод с различным содержанием  $\text{CO}_2$ ), гидротермальное растворение (увеличение растворимости кальцита при охлаждении восходящих термальных углекислых вод) и сернокислотное растворение (воздействие серной кислоты, образующейся окислением растворенного сероводорода глубинных восходящих вод кислородом вод близповерхностной системы стока при их смешении). Скважины и восходящие источники с сероводородсодержащими водами имеются в пределах северной и южной продольной депрессий, в т.ч. на исследуемом участке (рис. 2).

Установление гипогенного генезиса карстовых полостей Предгорья открывает новые перспективы использования данных карстолого-спелеологических

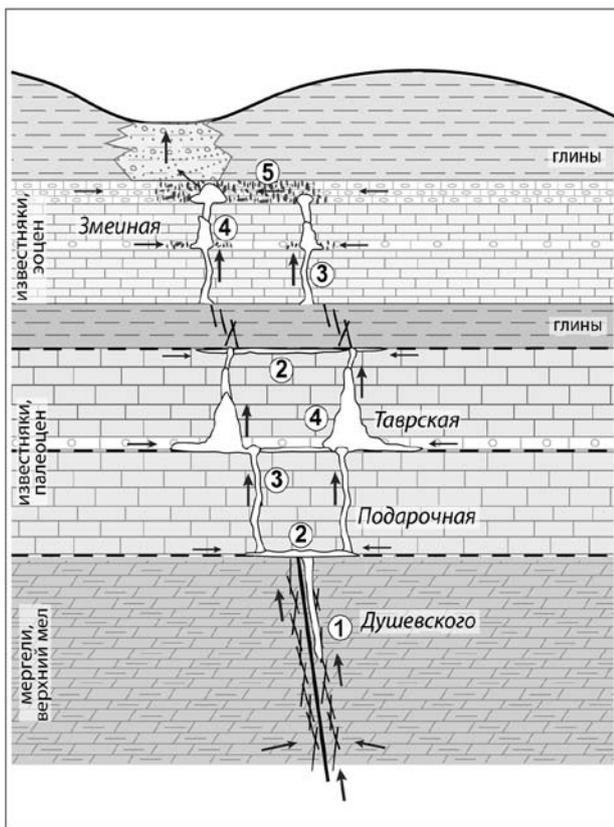


Рис. 1. Концептуальная модель гипогенного спелеогенеза Внутренней гряды Горного Крыма. Элементы каналово-полостной системы (номера в кружках): 1 - щелеобразные каналы по приразломным трещинным зонам в слаборастворимых породах; 2 - каналы по плоскостям напластования (обозначенным пунктиром); 3 - щелеобразные каналы по субвертикальным трещинам в известняках; 4 - крупные полости с обильными формами конвекционного растворения, образованные по линиям пересечения субвертикальных трещинных каналов с проницаемыми плоскостями напластования; 5 - зоны кавернозности. Надписями даны названия пещер, представительных для этих элементов (пещера Змеиная находится на другом участке гряды). Стрелками обозначены направления движения подземных вод на стадии формирования каналово-полостной системы (крупные стрелки – движение по трещинно-карстовым каналам, мелкие стрелки – движение по пластам с повышенной первичной пористостью).

Fig. 1. A conceptual model of hypogene speleogenesis in the Inner Range of the Mountainous Crimea. Elements of the void-conduit system (numbers in circles): 1 – slot-like (rift-like) conduits along fault-adjacent fracture zones in poorly soluble rocks; 2 – conduits along bedding planes (indicated by a dashed line); 3 – slot-like (rift-like) conduits along sub-vertical fractures in limestones; 4 – large voids with abundant features of convection dissolution, formed along lines of intersection of sub-vertical fracture conduits with permeable bedding planes or layers; 5 – zones of cavernosity. Names of caves, representative for respective elements, are shown (Zmeinaya Cave is in the other part of the range). Arrows indicate flow directions during the formation stage of the void-conduit system (larger arrows indicate flow along fracture conduits, smaller arrows indicate flow along beds of high primary porosity).

исследований для решения проблемных вопросов геологической и геоморфологической эволюции региона. Новая модель спелео-генеза подразумевает, что полости были образованы в принципиально иных, чем современные, геоморфологических и гидрогеологических условиях, и переходили в реликтовое состояние при формировании современной геоморфологической обстановки. Во-первых, гипогенные карстовые системы, как важный фактор усиления структурной неоднородности субстрата и концентрации под-земного стока, оказывали большое влияние на поверхностный геоморфогенез на стадии раскрытия эоцен-палеоценовой пластовой конструкции Предгорья. Во-вторых, гипогенные карстовые системы, ныне реликтовые, содержат информацию об изменениях гидрогеологических условий вмещающих массивов, вызванных перестройками рельефа и раскрытием ими различных толщ.

Настоящая статья иллюстрирует некоторые возможности извлечения такой информации. Она представляет первые данные по абсолютному датированию кальцитовых отложений (спелеотем) пещер юго-западной части Внутренней гряды Горного Крыма, позволяющие, с использованием новой модели регионального спелеогенеза, получить возрастную привязку ключевых этапов-состояний развития рельефа, а также оценить скорость денудационного углубления южной продольной депрессии (ЮПД) крымского Предгорья.

#### УЧАСТОК ИССЛЕДОВАНИЙ

Исследуемый участок находится в пределах юго-западной части Внутренней гряды, охватывая ее массив между поперечными долинами Бельбека и Качи (с доминирующими вершинами Арман-кая и Курушлюк) и соответствующий сегмент ЮПД, отчленяющей Внутреннюю гряду от Главной гряды (рис. 2). Внутренняя гряда тут представляет собой типичную куэсту, гребневая часть которой сложена обнаженными пологопадающими на северо-запад палеоценовыми (дат-инкерманскими) мшанковыми известняками, образующими вертикальные обрывы к южной продольной депрессии и поперечным долинам Бельбека и Качи. Палеоценовые известняки имеют мощность около 20 м и залегают на верхнемеловых мергелях, слагающих крутонаклонные сегменты склонов долин. На «спине» куэсты они перекрываются эоценовыми глинистыми и известняковыми отложениями.

Согласно схеме тектонического строения Крыма В.В. Юдина (Юдин, 1995) предгорные гряды расположены над падающей к северу-северо-западу Предгорной сутурой, по которой происходил поддвиг складчатого сооружения Горного Крыма под Скифскую плиту. По этой же линии проведена граница между меганадвигом Горного Крыма и структурами Скифской плиты (Центральнокрымским мегаподнятием) на карте тектоники Крыма в национальном Атласе Украины (Національний Атлас України, 2008). По другим представлениям (Атлас АРК, 2003) Скифская плита отделяется от Горного Крыма глубинной Предгорно-Крымской разломной зоной, пространственно совпадающей с подножьем южного аструктурного склона Внутренней гряды.



Рис. 2. Орографическая схема исследуемого участка Внутренней гряды, показывающая расположение изученных пещер.  
 Fig. 2. Orographic scheme of the study area in the Internal Range, showing locations of studies caves.

В схеме гидрогеологического районирования район пещеры относится к южной части Причерноморского артезианского бассейна, к краевой (юго-восточной) области питания Альминского бассейна. Со времени начала тектонической деформации миоценовой поверхности выравнивания и до времени своего денудационного расчленения палеоценовые известняки были частью моноклиальной водонапорной системы склона артезианского бассейна, в настоящее время раскрытой и сдренированной. В геоморфологическом отношении, период распада этой системы соответствует времени становления современного рельефа Предгорья и выражения в нем куэстовых гряд.

**КАЛЬЦИТОВЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ ПЕЩЕР И РЕЗУЛЬТАТЫ ДАТИРОВАНИЯ**

Пещеры Таврская и Подарочная заложены в слое дат-инкерманских известняков и открываются в обрыве куэсты юго-восточной экспозиции. Пещера Таврская является крупнейшей карстовой полостью Предгорья, состоящей из двух субпараллельных галерей в средней части пласта, к которым с востока и снизу примыкают характерные щелевидные хода, заложенные в нижней части пласта (Климчук, Тимохина, 2011; рис. 3). Пещера Подарочная представляет собой фрагмент такого же щелевидного хода, открывающегося в обрыве в 400 м к

юго-западу от Таврской. Положение каналов этого типа в гипогенной карстовой системе показано цифрой 3 на рис. 1.

В пещерах Подарочная и Таврская исследуемого участка нами выявлены два типа вторичных кальцитовых отложений (спелеотем):

1) Субазральные (вадозные) отложения представлены натечно-капельными (сталактиты и сталагмиты, колонны) и покровными (коры) образованиями. Такие отложения особенно широко развиты в пещере Таврская (рис. 4);

2) Субаквальные (фреатические) отложения представлены зональными корами, сложенными параллельно-шестоватым кальцитом коричневого цвета. Помимо характерных текстур, указывающих на фреатическое происхождение этого кальцита (Hill, Forti, 1997), субаквальное его образование подтверждается также преобладанием воды (свыше 99 моль.%) и низкими отношениями растворенных газов O<sub>2</sub>/Ar (указывающих на восстановительный характер среды) в его флюидных включениях.

Субаквальные кальцитовые коры приурочены к ходам щелеобразной морфологии. В пещере Таврской крупные фрагменты кальцитовой коры этого типа обнаружены в самом щелеобразном ходе, а также на стенах и сводах основной галереи в области

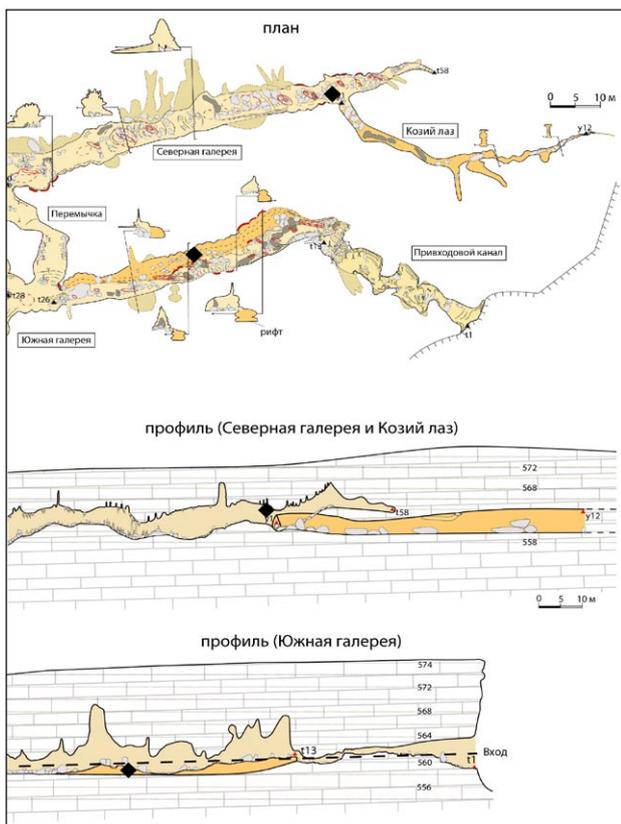


Рис. 3. Фрагмент морфогенетической карты пещеры Таврская, показывающий положение мест обнаружения фреатического кальцита (отмечены ромбами).

Fig. 3. Fragment of the morphogenetic map of Tavrskaya Cave showing locations of phreatic calcite (indicated by diamond symbols).

примыкания (рис. 3 и 5). В последнем случае коры несут явные следы растворения в условиях полного водонасыщения (рис. 5-Б). В пещере Подарочной коры этого типа покрывают нижнюю часть стен щелевидного хода (рис. 6).

Образцы спелеотем обоих типов были подвергнуты абсолютному датированию в лабораториях университетов Киля (Германия) и Миннесоты (США) по соотношениям U/Th методами плазменной и термоионизационной масс-спектрометрии. Подробности соответствующих аналитических процедур приведены в работах Fietzke et al. (2005) и Edwards, Cheng, Wasserburg (1987). Датированию подвергнуты четыре сталагмита из пещеры Таврской, в каждом из которых определения выполнены по трем точкам вдоль оси роста. Для фреатического кальцита выполнена одна датировка в образце из пещеры Подарочная. Результаты датирования представлены в таблице 1, а также на рис. 7, где показано распределение полученных дат по шкале времени в сопоставлении со шкалой морских изотопных стадий (MIS).

### ОБСТАНОВКИ ФОРМИРОВАНИЯ СПЕЛЕОТЕМ

Произведенное датирование разнотипных кальцитовых отложений из пещер Таврской и Подарочной дает временные привязки важным



Рис. 4. Субаэральные натечно-капельные кальцитовые отложения в пещере Таврская (главная галерея). На фото также видны мезоформы гипогенной морфологии.

Fig. 4. Subaerial speleothems in Tavrskaya Cave (the main passage). In the photo meso-forms of hypogene morphology are also observable.

событиям спелеогенетической и геоморфологической эволюции региона (С1 и С2 на рис. 7). Ниже дается интерпретация гидрогеологических и геоморфологических условий, соответствующих этим событиям. На рис. 8 представлена схематическая визуализация обстановок, соответствующих событиям 1 и 2.

1. Отложение фреатического кальцита, 253 тыс. лет назад (С1). Время соответствует второй половине среднего плейстоцена, концу морской изотопной стадии (MIS) 8 (периода похолодания), пику периода низкого положения уровня Мирового океана.

Кальцитовые коры пещер Подарочная и Таврская являются отложениями восходящих карстовых источников. Они отлагались в условиях восходящего перетока вод, возможно слаботермальных (не выше примерно 50 °С по данным исследования флюидных включений), из нижележащих толщ через карстовую систему в палеоценовых известняках. Отложение кальцита происходило в близповерхностных условиях вследствие падения температуры и давления, сопровождающихся дегазацией. Аналогичный кальцит встречается во многих полостях современных или реликтовых восходящих карстовых источников, связанных с глубокой циркуляцией.

Залегание коры по сформированной ранее скульптурной поверхности пещер указывает на практически полное оформление морфологии последних ко времени отложения кальцита. Функционирование восходящих источников, питаемых гипогенными каналовыми системами типа пещер Подарочная и Таврская (с отложением фреатического кальцита в них) подразумевает, что днища отдельных эрозийных долин, углублением и слиянием которых будет впоследствии образована ЮПД, находилось выше этих полостей.

Таким образом, возраст фреатического кальцита соответствует ранней фазе денудационного раскрытия Внутренней гряды на этом участке, в которой палеоценовые известняки были вскрыты днищами долин, заложенных в эоценовых отложениях, но еще

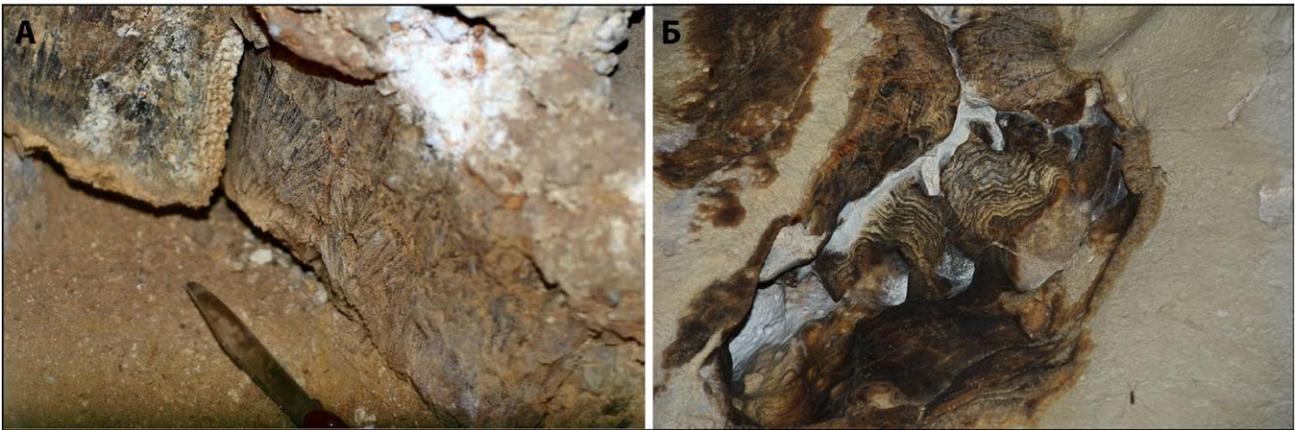


Рис. 5. Субаквальный (фреатический) кальцит в пещере Таврская: А – фрагменты коры в щелеобразном ходе; Б – остатки подрастворенной коры в потолочных куполах (вид снизу вверх).

Fig. 5. Subaqueous (phreatic) calcite in Tavrskaya Cave: A – fragments of the crust in a slot-like passage; Б – remnants of partially dissolved crust in ceiling cupolas (viewing up from below).



Рис. 6. Субаквальный (фреатический) кальцит в пещере Подарочная.

Fig. 6. Subaqueous (phreatic) calcite in Podarochhnaya Cave.

не взрезаны ими (рис. 8, вверху). Произшедшие уже к этому времени продольное расчленение и эксгумация жесткого пласта нуммулитовых известняков уже наметили выражение Внутренней гряды в рельефе, но еще не создали единого фронта куэстовых обрывов.

Вероятно, что эта фаза развития ЮПД связана с прохождением в полосу внутреннего Предгорья пульса углубления долин, вызванного низким положением базиса эрозии (уровня Черного моря) во время предшествующего стадиала (MIS 8), а также пульсом поднятия. Следы скульптурного (конвективного) растворения по субаквальной кальцитовой коре указывают на сохранение фреатических условий в массиве в течение какого-то времени после отложения кальцита, со сменой гидрохимического режима осаждения на режим растворения. Такая смена могла быть связана с интенсификацией подтока вод мелкой циркуляции в процессе раскрытия пластовой структуры Предгорья.

2. Начало интенсивного формирования сталагмитов. 130 тыс. лет назад (C2). Время соответствует началу MIS 5, рубежу среднего и верхнего плейстоцена, началу микулинского межстадиала севера Евразии и рисс-вюрмского межстадиала Альп.

Древнейшие даты, полученные из оснований сталагмитов, могут рассматриваться как минимальный возраст установления вадозных условий в пещерах, т.е. условий их полного дренирования и возникновения вертикальной нисходящей фильтрации от поверхности. Первое условие подразумевает углубление днища ЮПД существенно ниже уровня заложения полостей (т.е. – практически полное расчленение их смежной долиной), а второе – обнаженность поверхности пласта палеоценовых известняков из-под слабопроницаемого покрова (т.е. – обнажение структурного склона палеоценовой куэсты). Таким образом, геоморфологические условия начала формирования сталагмитов включают отчетливую выраженность палеоценовой куэсты в рельефе вследствие денудационного расчленения известняковой толщи со стороны ЮПД. Для отложения натечно-капельного кальцита нисходящей фильтрацией необходимы также благоприятные климатические условия (достаточное количество осадков при относительно теплом климате).

Датировки по основаниям всех четырех сталагмитов варьируют в узком диапазоне 125-130 тыс.

**Таблица 1**

Результаты абсолютного U/Th датирования кальцитовых отложений пещер юго-западной части Внутренней гряды Горного Крыма

Results of absolute U/Th dating of calcite speleothems of caves of the south-west part of the Inner Range of Mountainous Crimea

Образцы, точки датировок	Локализация образцов и точек	Возраст, тыс. лет	Ошибка, ± тыс. лет
<b>Пещера Таврская</b>			
Сталагмит T19*	Главная галерея		
T19-I-A	<i>вершина</i>	14,3	0,9
T19-III-A	<i>нижняя часть</i>	125,4	10,8
T19-IV-A	<i>основание</i>	129,15	8,19
Сталагмит T21*	Главная галерея		
T17-A	<i>вершина</i>	64,33	3,21
T17-B	<i>средняя часть</i>	114,85	9,70
T17-C	<i>основание</i>	127,14	8,40
Сталагмит T22*	Главная галерея		
T22-S-II-A	<i>нижняя часть</i>	127,79	12,20
T22-S-II-B	<i>основание</i>	129,9	7,8
Сталагмит T33*	Главная галерея		
T33-I-A	<i>вершина</i>	67,4	1,5
T33-I-B	<i>средняя часть</i>	119,8	8,5
T33-II-A	<i>основание</i>	124,9	13,6
<b>Пещера Подарочная</b>			
Кора параллельно-шестоватого кальцита LC**	«рифтовый» ход	253,25	3,3

\* Датирование выполнено методом плазменной масс-спектрометрии (MC-ICPMS) в лаборатории университета Киля (Германия; аналитик Антон Эйзенхауер; подробности аналитических процедур содержатся в Fietzke et al., 2005).

\*\* Датирование выполнено методом термоионизационной масс-спектрометрии (TIMS) в лаборатории университета Миннесоты (США; аналитик Хай Чен; подробности аналитических процедур содержатся в Edwards, Cheng, Wasserburg, 1987).

лет. «Спусковым» для образования сталагмитов среди отмеченных выше условий, вероятно, было изменение климата, но необходимые геоморфологические и гидрогеологические условия, т.е. - хорошая выраженность куэсты в рельефе района и понижение уровня подземных вод в приборочной части ниже уровня пещер, уже существовали.

3. Прекращение роста большинства сталагмитов, 65 тыс. лет назад (С3). Датировки по вершинам сталагмитов T21 и T33 фиксируют прекращение их роста около 65 тыс. лет назад. Хотя в сталагмите T22 вершина не была датирована, но сходство его внутренней структуры с упомянутыми выше сталагмитами позволяют предположить то же время завершения его роста. Лишь в сталагмите T19 вершина датируется более поздним временем, однако в структуре его верхней части есть несогласие, по-видимому, также соответствующее рубежу около 65 тыс. лет.

Событие С3 соответствует середине позднего плейстоцена, MIS 4, началу холодного периода

валдайской стадии севера Евразии. Очевидно, что причиной прекращения роста сталагмитов было изменение климата. Датировка вершины сталагмита T19 на уровне 14,3 тыс. лет указывает на возобновление его роста за некоторое время до этой даты и прекращение на ней; но при этом рост прочих сталагмитов не возобновлялся. Время прекращения роста сталагмита T19 соответствует поздней стадии вюрмской эпохи.

### ВОЗРАСТ РЕЛЬЕФА ПРЕДГОРЬЯ

Взгляды исследователей на возраст рельефа Предгорья различаются в широких пределах. Высказывалось мнение (Гришанков и др., 1973) о его позднемиоценовом возрасте. Н.С. Благоволин (1966) относил возникновение обеих гряд Предгорья и продольных депрессий к неогену, а Н.И. Николаев (1946) - появление Внутренней гряды к началу верхнего плиоцена. М.Е. Кострицкий и В.Н. Терехова (1957) считали, что заложение главнейших элементов

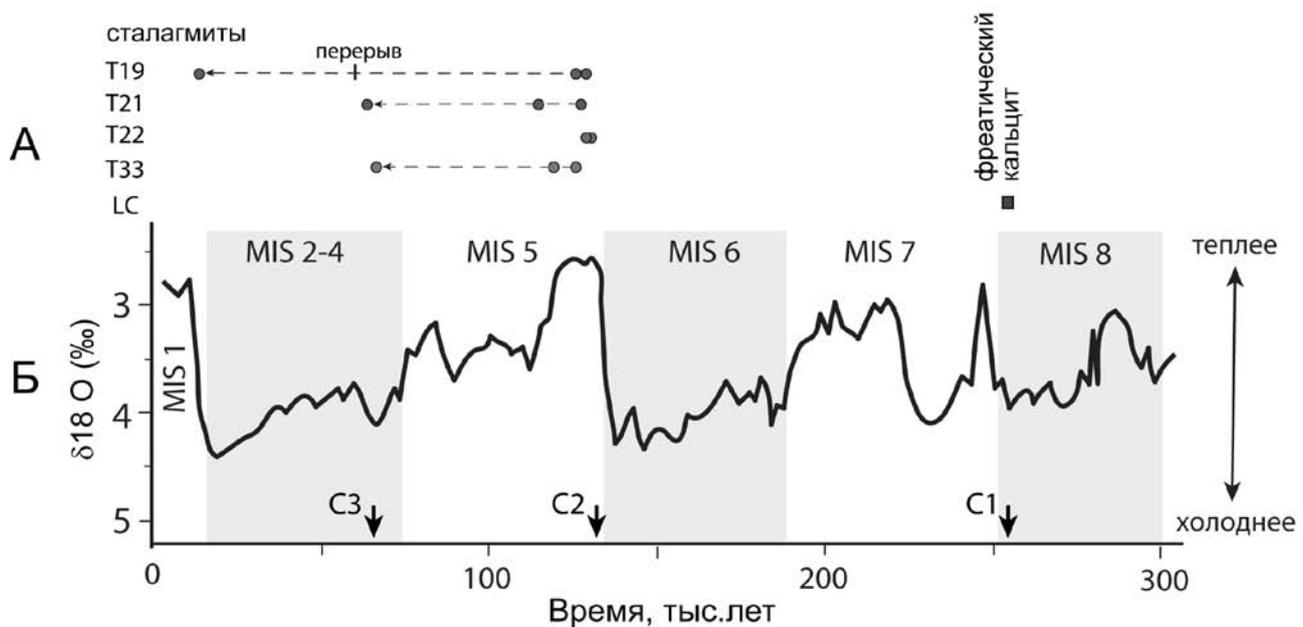


Рис. 7. А - датировки кальцитовых отложений из пещер Таврская (сталагмиты; даты обозначены кружками) и Подарочная (фреатический кальцит, обозначен квадратом). Б - кривая, отражающая глобальные изменения климата в гляциальные и межгляциальные эпохи и стадии климатических изменений по изотопии кислорода донных морских осадков MIS (Beal et al., 2011). Стрелки на шкале времени отмечают события: С1 - отложение фреатического кальцита в каналовой системе восходящего источника; С2 - начало образования сталагмитов - минимальный возраст перехода каналовой системы в субэаральное состояние; С3 - прекращение роста большинства сталагмитов.

Fig. 7. А - dating of speleothems from caves Tavrskaya (stalagmites; indicated by circles) and Podarochnaya (phreatic calcite, indicated by a square). Б - Stable oxygen isotope profile as a proxy for glacial-interglacial variations in global climate, and marine isotope stages (after Beal et al., 2011). Arrows on the time scale indicate particular events: C1 - deposition of phreatic calcite in the conduit system of a rising spring; C2 - beginning of the stalagmite formation - minimal age of the system transition into vadose conditions; C3 - termination of growth of the most stalagmites.

рельефа региона происходило в дочетвертичное, а становление близкого к современному облика - в раннечетвертичное время. В работах (Никишин и др., 2006; Никитин и др., 2006) начало выражения палеоценовой куэсты и ЮПД в рельефе связывается с позднекуэльным временем, а хорошая выраженность этих основных компонентов в рельефе - с эоплейстоценом. Б.А. Вахрушев (2010) относит формирование ЮПД и Внутренней гряды к промежутку от среднего плиоцена до раннего плейстоцена. Молодым, полностью четвертичным, считал рельеф Предгорья М.В. Муратов (1960).

Следует отметить, что эти оценки выводились из принятых авторами концепций региональной геологической (тектонической) эволюции и геодинамики, относительной последовательности постулируемых событий и т.п., но не основывались на твердых возрастных привязках конкретных геолого-геоморфологических реперов.

Представленные в настоящей работе результаты дают абсолютные датировки вполне определенных геоморфологических обстановок (рис. 8) и, таким образом, составляют надежную основу для определения возраста рельефа Предгорья. Возрастная «вилка» 253 - 130 тыс. лет назад между охарактеризованными выше событиями С1 и С2 охватывает период интенсивного развития рельефа Внутренней гряды в изучаемом участке и его становления в виде, близком к современному. Именно в течение этого периода

оформилось отчетливое выражение в рельефе ЮПД и палеоценовой куэсты. Следовательно, этот период - вторая половина среднего плейстоцена - может рассматриваться как характеризующий возраст рельефа Предгорья в полосе Внутренней гряды и ЮПД. В дальнейшем происходило углубление ЮПД процессами комплексной денудации, практически не влиявшее на гидрогеологические условия в слое палеоценовых известняков в прирвовочной части куэсты.

Таким образом, наши результаты изменяют предшествующие представления о возрасте рельефа региона в сторону существенного омоложения.

## ОЦЕНКА СКОРОСТИ ДЕНУДАЦИИ

Проблема оценки динамики денудации, ее интенсивности в различные периоды развития рельефа, является одной из центральных проблем геоморфологии (Борсук, Спасская, Тимофеев, 1977).

Непосредственные измерения скорости денудации на экспериментальных площадках являются «мгновенными» значениями, малопригодными для пространственной и временной интерполяции ввиду их высокой локальной избирательности и специфичности по отношению к вариабельным агентам и условиям денудации. Большинство других методов оценки скорости денудации дают интегральные величины для различных площадей и (или) интервалов времени,

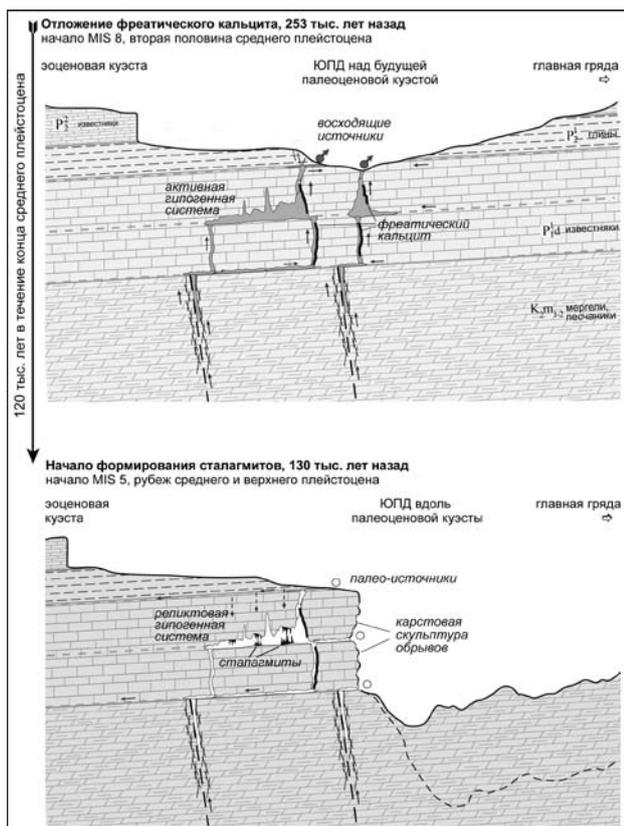


Рис. 8. Эволюция Внутренней гряды и южной продольной депрессии юго-западной части Горного Крыма во второй половине среднего плейстоцена по спелеохронологическим данным. Схематическое изображение геоморфологических и гидрогеологических условий для фаз отложения фреатического кальцита (вверху; 253 тыс. лет назад) и начала формирования сталагмитов (внизу; 130 тыс. лет назад).

Fig. 8. Evolution of the Inner Range and the southern longitudinal depression in the second half of Middle Pleistocene according to speleo-chronological data. A schematic representation of geomorphological and hydrogeological conditions for phases of deposition of the phreatic calcite (above; 253 ka BP) and of the beginning of the formation of stalagmites (below; 130 ka BP).

в той или иной степени соответствующие понятию «общей» или «комплексной» денудации.

Скорость денудации может быть измерена через сток взвешенного (механическая денудация) или растворенного (химическая денудация) материала, баланс осадков (например, озерных), трековыми методами, по космогенным изотопам, а также по денудационному срезу между датированными уровнями. Сопоставление значений скорости денудации, полученных разными методами, может производиться с осторожностью, с существенными оговорками и учетом различий в методах их получения, поскольку они представляют разную степень пространственной (локальные, бассейновые или региональные данные) и временной (за интервалы времени от  $10^2$  до  $10^6$  и более лет) интеграции.

Для задач геоморфологии, наиболее представительными следует считать данные, интегрирующие скорость денудации в промежутках времени  $10^2$  –  $10^6$  лет, достаточно длительных,

чтобы получаемые показатели сглаживали короткопериодические пертурбации, но отражали определенную динамику как выветривания, так и поднятия (von Blanckenburg, 2005). Оценки в таких масштабах времени для Горного Крыма в целом и отдельных его регионов отсутствуют.

Абсолютное датирование геоморфологических обстановок, схематически изображенных на рис. 8, дает возможность оценить скорость денудационного (преимущественно эрозионного) углубления ЮПД. Время формирования фреатического кальцита вполне определено соответствует обнаженности поверхности палеоценовых известняков из-под зооценовой глинистой толщи в днище ЮПД. При более высоком положении днища ЮПД в разрезе глинистая толща препятствовала бы интенсивной разгрузке через источники и падению давления, а при более низком положении терялись бы фреатические условия. В современном рельефе участка этот уровень соответствует отметке примерно 580 м, а нынешнее положение тальвега депрессии – отметке 240 м.

Таким образом, за последние 253 тыс. лет днище ЮПД на исследуемом участке углубилось примерно на 340 м, что дает среднюю скорость углубления за весь этот период в 1,36 мм/год. Точность этой величины может быть консервативно оценена в  $\pm 0,08$  мм/год (допущением отклонений в  $\pm 20$  м от принятого уровня днища долины). Это значение выше средней скорости денудации в Центральных Альпах для периода последних 1,5 тыс. лет, установленной по космогенным изотопам в 0,9 мм/год, при бассейновых вариациях от 0,5 до 1,3 мм/год (Wittmann et al., 2007). С учетом более высоких темпов поднятия Альп по сравнению с Горным Крымом, можно было бы ожидать обратного соотношения. Однако оценки для Альп отражают скорость общей денудации в водосборных бассейнах, тогда как наши оценки для Предгорного Крыма соответствуют скорости денудационного углубления долины, которая обычно существенно превышает скорость денудации на склонах и водоразделах. С учетом этого, полученная нами оценка хорошо согласуется с упомянутыми значениями скорости денудации в Альпах. Уместно также сопоставление нашей оценки со значениями скоростей денудации 1,7 - 7,0 мм/год, полученными для различных хребтов Тянь-Шаня и Гиндукуша по денудационному срезу за периоды времени от 7 тыс. до 34 тыс. лет (Никонов, 1973).

Возможна дифференциация полученного значения скорости денудационного углубления ЮПД по периодам между датированными событиями 1 и 2 (рис. 8) и между событием 2 и современностью. Однако она затрудняется неопределенностью уровня углубления ЮПД на момент события 2 (начала формирования сталагмитов). Возможность формирования сталагмитов возникла уже при углублении ЮПД на 50-70 м относительно обстановки события 1, но само начало их формирования связано с климатическими причинами и могло произойти и при существенно более глубоком положении днища ЮПД (пунктирная линия на нижней схеме рис. 8). Приняв разницу отметок днища ЮПД между событиями 1 и 2 в 70 м, получим скорость углубления 0,58 мм/год для эпохи конца среднего

плейстоцена, что намного меньше скорости углубления в последующую позднеплейстоцен-голоценовую эпоху (2,08 мм/год). Такое различие в скорости денудации в принципе возможно, как по причинам различий в денудационной устойчивости слоя палеоценовых известняков и подстилающих верхнемеловых мергелей (последние значительно более податливы денудации), так и по причине различий в темпах поднятия. Однако более вероятной представляется меньшая степень дифференциации скоростей между этими периодами. Принятием разницы отметок в 140 м получаем скорости денудационного углубления ЮПД 1,17 мм/год для эпохи конца среднего плейстоцена и 1,54 мм/год в позднеплейстоцен-голоценовый период. По-видимому, реальные скорости находятся между этими оценками. С точностью в пределах  $\pm 0,3$  мм/год они могут быть оценены в 0,9 мм/год для эпохи конца среднего плейстоцена и 1,8 мм/год для эпохи позднего плейстоцена-голоцена.

Привсей отмеченной неопределенности, примерная дифференцированная по периодам оценка позволяет сделать вывод о существенном увеличении скорости денудационного углубления ЮПД в позднеплейстоцен-голоценовое время по сравнению со второй половиной среднего плейстоцена. Для региона Альп показано (Wittmann et al., 2007), что главным фактором, контролирующим скорость денудации является темп поднятий, поэтому установленное для Предгорья увеличение скорости денудационного углубления ЮПД в эпоху позднего плейстоцена следует рассматривать как показатель соответствующего увеличения скорости поднятия.

## ВЫВОДЫ

Гипогенные карстовые системы Внутренней гряды Горного Крыма, ныне реликтовые, содержат датруемые индикаторы гидрогеологических условий вмещающих массивов, позволяющие выявить время их изменений, вызванных перестройками рельефа и денудационным раскрытием вмещающих и смежных толщ.

Выполненное (впервые для региона) абсолютное датирование различных типов спелеотем пещер юго-западной части Внутренней гряды Горного Крыма позволило получить возрастную привязку периода завершения гипогенного развития карстовых систем, ключевых этапов-состояний развития рельефа в этой полосе, а также оценить скорость денудационного углубления южной продольной депрессии. Установлено, что основные элементы рельефа Предгорья (Внутренняя гряда и прилегающие участки южной продольной депрессии) сформированы в течение второй половины среднего плейстоцена, что изменяет прешествующие представления о возрасте рельефа региона на сторону существенного омоложения. По денудационному срезу между датированными уровнями определена скорость денудационного углубления депрессии за временной промежуток последних 250 тыс. лет, составляющая 1,36 мм/год ( $\pm 0,08$  мм/год). Дифференцированная оценка для интервалов второй половины среднего плейстоцена (250 – 130 тыс. лет) и позднего плейстоцена-голоцена

(последние 130 тыс. лет) возможна с меньшей степенью точности и составляет, соответственно, 0,9 и 1,8 мм/год ( $\pm 0,3$  мм/год). Это указывает на существенное увеличение скорости денудационного углубления южной продольной депрессии в позднеплейстоцен-голоценовое время по сравнению со второй половиной среднего плейстоцена, что является показателем соответствующего увеличения скорости поднятия.

## ЛИТЕРАТУРА

- Beal L.M., De Ruijter W.P.M., Biastoch A., Zahn R. On the role of the Agulhas system in ocean circulation and climate // *Nature*. – 2011. – № 472. – P. 429-436. doi:10.1038/nature09983
- von Blanckenburg, F. The control mechanisms of erosion and weathering at basin scale from cosmogenic nuclides in river sediment // *Earth Planet. Sci. Lett.* – 2005. – № 237. – P. 462–479.
- Edwards R.L., Cheng J.H., Wasserburg G.L. 238U-234U-230Th systematic and the precise measurement of time over the past 500,000 years // *Earth and Planetary Science Letters*. – 1987. – № 81. – P. 175–192.
- Fietzke J., Liebetrau V., Eisenhauer A., Dullo C. Determination of uranium isotope ratios by multi-static MIC-ICP-MS: method and implementation for precise U- and Th-series isotope measurements // *J. Anal. At. Spectrom.* – 2005. – № 20. – P. 395–401.
- Ford D., Williams P. *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. – Chichester: Wiley, 2007. – 562 p.
- Hill C.A., Forti P. *Cave Minerals of the World*. – Huntsville, Alabama: National Speleological Society, 1997. – 463 p.
- Klimchouk A.B. Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and Morphogenetic Perspective // *Special Paper no. 1*. – Carlsbad, NM: National Cave and Karst Research Institute, 2007. – 106 p.
- Klimchouk A.B., Ford D.C., Palmer A.N., Dreybrodt. Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers. – Huntsville: National Speleological Society, Inc., 2000. – 527 p.
- Lauritzen S.-E. (Ed.). *Climate Change: The Karst Record*. Karst Waters Institute Special Publication No 2. – Leesburg, Virginia: Karst Waters Institute. – 1996. – 196 p.
- Palmer A. *Cave Geology*. – USA, OH: Cave Books, 2007. – 454 p.
- Wittmann H., von Blanckenburg F., Kruesmann T., Norton K.P., Kubik P.W. Relation between rock uplift and denudation from cosmogenic nuclides in river sediment in the Central Alps of Switzerland // *Journal of Geophysical Research*. – 2007. – № 112. – F04010. doi:10.1029/2006JF000729/
- Атлас Автономной республики Крым. – Киев-Симферополь, 2003. – 80 с.
- Благоволлин Н.С. Некоторые вопросы истории развития рельефа Горного Крыма // *Строение Черноморской впадины*. – М.: Наука, 1966. – С. 59.
- Борсук О.А., Спасская И.И., Тимофеев Д.А. Вопросы динамической геоморфологии // *Итоги науки и техники. Сер. Геоморфология*, т.5. - Москва, 1977. - 150 с.
- Вахрушев Б.О. Кримські гори // *Рельєф України. Навчальний посібник / Вахрушев Б.О., Ковальчук І.П., Комлев О.О., Кравчук Я.С., Палієнко Е.Т., Рудько Г.І., Стецюк В.В.* – Київ: «Слово», 2010. – С. 432 – 485.
- Гришанков Г.С., Підгородецький П.Д., Губанов І.Г. Основні риси геоморфології Криму // *Фізична географія та геоморфологія*. – 1973. – № 9. – С. 57–63.
- Дублянський В.Н., Дублянська Г.Н. *Карстова республіка*. – Симферополь, 1996. – 88 с.
- Дублянський В.Н., Ломаєв А.А. *Карстові печери України*. – К.: Наук. думка, 1980. – 180 с.

- Душевский В.П. К формированию поверхностных форм карста Предгорного Крыма // Проблемы географии Крыма. – Симферополь, 1971. – С. 21–25.
- Душевский В.П. Морфология поверхностных форм карста Предгорного Крыма // Физическая география и геоморфология. – 1978. – Вып. 20. – С. 36–43.
- Душевский В.П. Этапы поверхностного закарстования Предгорного Крыма // Пространство и время в географии. – Казань, 1987. – С. 101–103.
- Душевский В.П., Лысенко Н.И. О возрасте пещер Крымского Предгорья // Состояние, задачи и методы изучения глубинного карста СССР. – М., 1982. – С. 174.
- Душевский В.П. Карстові порожнини Внутрішнього куестового пасма Криму // Физическая география и геоморфология. – 1970. – Вып. 4. – С. 114–118.
- Климчук А.Б. Эволюционная типология карста // *Спелеология и карстология*, - № 4. – Симферополь. – 2010. – С. 23-32.
- Климчук А.Б., Амеличев Г.Н., Тимохина Е.И. Геология, геоморфология и карст западной части Предгорного Крыма // Ландшафтное разнообразие. Крым 2010. Путеводитель научно-практического полевого семинара (авт. Позаченюк Е.А., Климчук А.Б., Тимченко З.В. и др.). – Симферополь, 2010. – С. 28–48.
- Климчук А.Б., Амеличев Г.Н., Тимохина Е.И. Гипогенный карст юго-западной части Предгорного Крыма // Геологический журнал. – 2009. – № 1. – С. 63–82.
- Климчук А.Б., Тимохина Е.И. Морфогенетический анализ пещеры Таврская (Внутренняя гряда Предгорного Крыма) // *Спелеология и карстология*. – 2011. - №6. – С. 36-52.
- Костицкий М.Е., Терехова В.Н. К геоморфологии Крымского предгорья // Известия Крымского педагогического института. – 1957. – Т. XXVIII. – С. 489–521.
- Львова О.В., Мелешин В.П. Карст Передгірного та Рівнинного Криму // Физическая география и геоморфология. – 1970. – Вып. 4. – С. 104–112.
- Муратов М.В. Краткий очерк геологического строения Крымского полуострова. – М.: Госгеолтехиздат, 1960. – 230 с.
- Национальный Атлас України. – Київ: ДНВП Картографія, 2008. – 440 с.
- Никитин М.Ю., Седаева К.М., Майорова Т.П. Путеводитель по первой крымской учебно-геологической практике. Ч.1. – Сыктывкар, 2006. – 154 с.
- Никишин А.М., Алексеев А.С., Барабошкин Е.Ю., Болотов С.Н., Копачевич Л.Ф., Габдуллин Р.Р. и др. Геологическая история Бахчисарайского района Крыма. – М.: МГУ, 2006. – 58 с.
- Николаев Н.И. О возрасте рельефа Горного Крыма // Бюллетень комиссии по изучению четвертичного периода. – 1946. – № 8. – С.103–105.
- Никонов А.А. Определение скорости врезания рек // *Геоморфология*, №1, 1973 с.24–36.
- Юдин В.В. Предгорная сутура Крыма // *Геологічний журнал*. – 1995. – № 3-4. – С. 56–61.