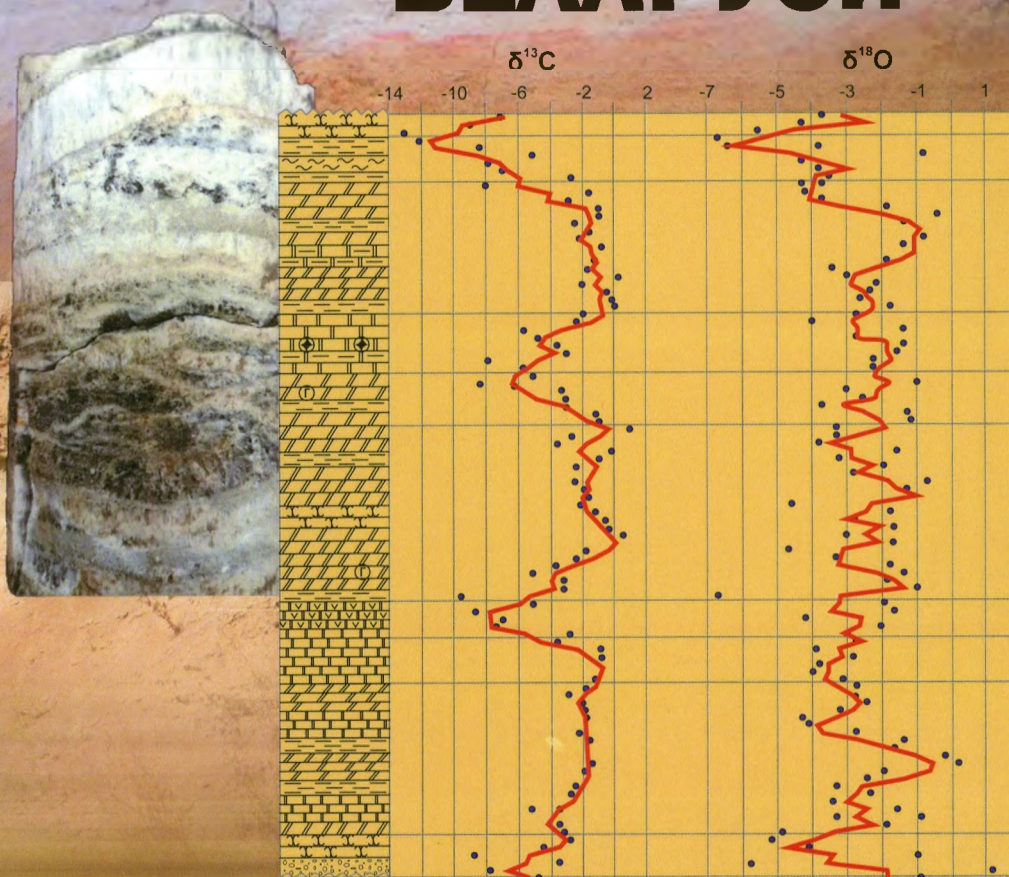




А. А. Махнач, Н. А. Махнач, Б. Г. Покровский

# ГЕОХИМИЯ СТАБИЛЬНЫХ ИЗОТОПОВ В ПЛАТФОРМЕННОМ ЧЕХЛЕ БЕЛАРУСИ



УДК 551.464.6.027:551.734.5 (476)

**Махнач, А. А.** Геохимия стабильных изотопов в платформенном чехле Беларуси / А. А. Махнач, Н. А. Махнач, Б. Г. Покровский ; Нац. акад. наук Беларуси, Ин-т природопользования. — Минск : Беларуская навука, 2022. — 373 с. — ISBN 978-985-08-2823-1.

Монография включает материалы по геохимии стабильных изотопов углерода, кислорода и серы в платформенном чехле Беларуси, полученные в течение тридцати последних лет. Охарактеризована изотопная хемотратиграфия ряда разрезов, дано описание разработанных авторами изотопных индикаторов обстановок седименто- и литогенеза отложений от рифея до квартала. Показаны возможности изотопных индикаторов для палеогеографических, палеоклиматических, палеогидрологических реконструкций, решения геоэкологических задач. Представлен большой исходный аналитический материал.

Книга предназначена для геохимиков, геологов, географов, геоэкологов. Может быть полезна студентам, магистрантам, аспирантам и преподавателям геологических и географических специальностей.

Табл. 55. Ил. 99. Библиогр.: 357 назв.

Рецензенты:

академик НАН Беларуси, доктор геолого-минералогических наук, профессор *А. В. Матвеев*  
академик РАН, доктор геолого-минералогических наук *Я. Э. Юдович*

ISBN 978-985-08-2823-1

© Махнач А. А., Махнач Н. А.,  
Покровский Б. Г., 2022  
© Оформление. РУП «Издательский дом  
«Беларуская навука», 2022



## ВВЕДЕНИЕ

Одним из важных направлений в науках о Земле является исследование поведения стабильных изотопов в геологических и других природных процессах. Стабильные изотопы углерода, кислорода, серы, стронция, кальция, магния, кремния, хлора, железа используются как индикаторы генезиса минералов, горных пород, полезных ископаемых, подземных вод, как инструмент хемотратиграфии, палеогеографических, палеоклиматических, палеогидрологических, палеогидрогеологических реконструкций, для решения вопросов геоэкологического характера.

Настоящая монография представляет собой собрание материалов по изотопной геохимии платформенного чехла Беларуси, опубликованных более чем за тридцать последних лет. Для данного издания эти материалы были систематизированы, уточнены, дополнены и во многих случаях переинтерпретированы.

Территория Беларуси расположена на западе Восточно-Европейской платформы. Здесь на кристаллическом фундаменте архейско-раннепротерозойского возраста залегает платформенный чехол, сложенный образованиями рифея, венда и всех геологических периодов фанерозоя (рис. 1). Чехол почти целиком состоит из осадочных пород, которые в ряде районов прорываются магматическими образованиями или переслаиваются с ними. Коренные породы на территории Беларуси практически полностью перекрыты четвертичными отложениями.

По глубине залегания кристаллического фундамента (мощности чехла) на территории Беларуси выделяются: обширная положительная структура (Белорусская антеклиза), три крупные отрицательные структуры (Припятский прогиб, Подляско-Брестская и Оршанская впадины) и четыре структуры с глубиной залегания фундамента, промежуточной между отрицательными и положительными структурами (Латвийская, Полесская, Жлобинская и Брагинско-Лоевская седловины) [19] (рис. 2). Кроме того, небольшие участки территории Беларуси занимают Украинский кристаллический щит, Балтийская синеклиза, Воронежская антеклиза, Луковско-Ратновский горст и Волынская моноклираль.

*Белорусская антеклиза* почти полностью охватывает северо-западную четверть площади страны и смежные районы Польши и Литвы. Абсолютные

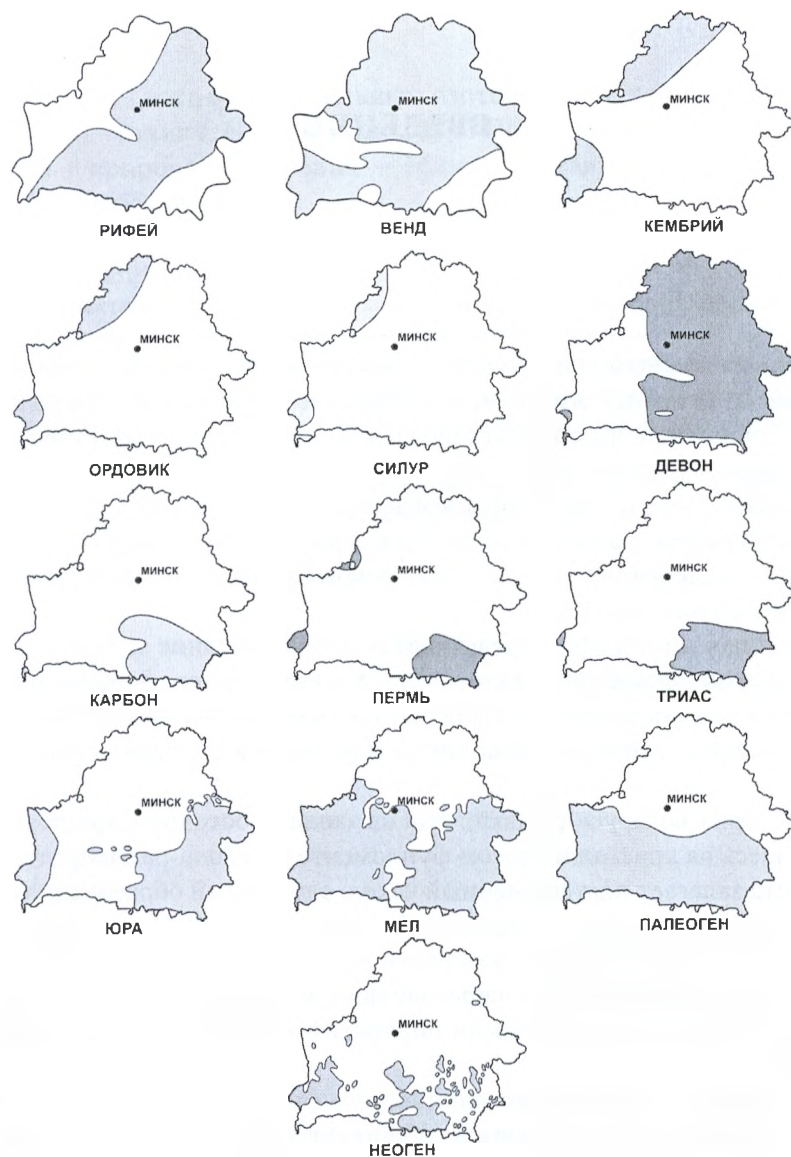


Рис. 1. Распространение отложений разного геологического возраста на территории Беларуси [19, 130]

отметки залегания фундамента на большей части антеклизы не превышают  $-0,5$  км, а в наиболее приподнятой части достигают  $+0,1$  км. Платформенный чехол антеклизы маломощный, представлен позднепротерозойскими, раннепалеозойскими, девонскими, мезозойскими и кайнозойскими отложениями.

*Припятский прогиб* расположен на почти всей юго-восточной четверти территории Беларуси. Кровля фундамента залегает на глубинах от 1,5 до 6 км. Наибольшая часть чехла прогиба приходится на девонские и каменноугольные

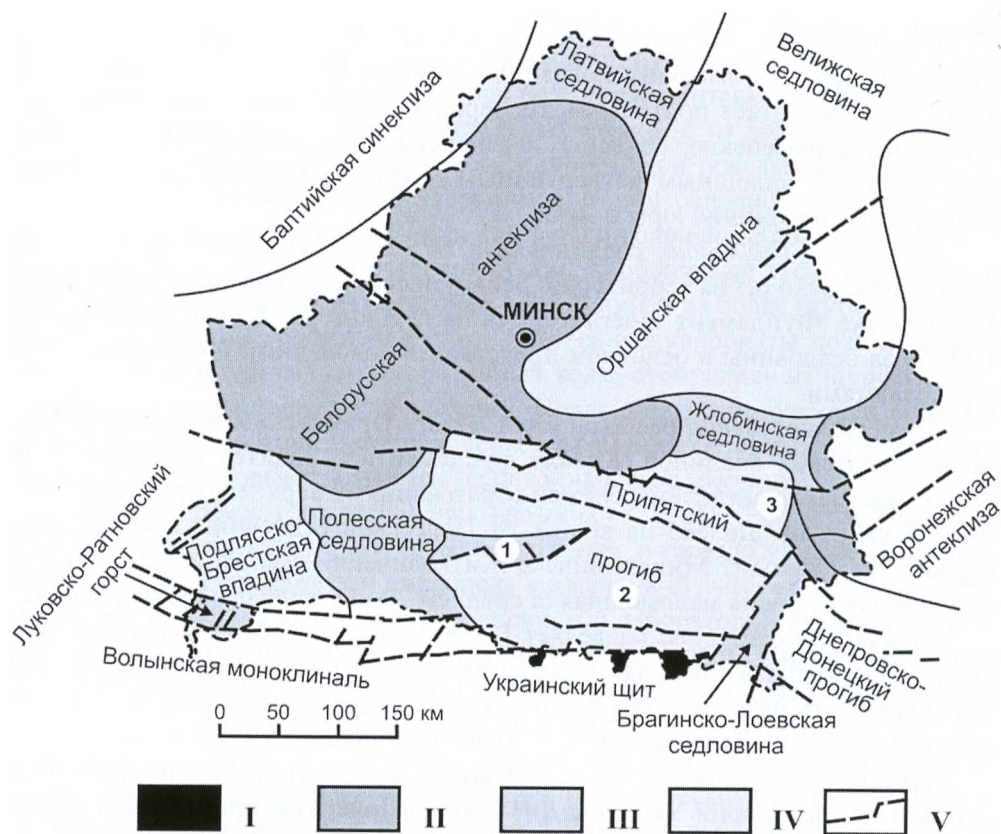


Рис. 2. Схема тектонического районирования территории Беларуси [19]: I – кристаллический щит, II – антеклизы, III – седловины, выступы, IV – прогибы, впадины, синеклизы, V – разломы; цифры на карте: 1 – Микашевичско-Житковичский выступ, 2 – Припятский грабен, 3 – Северо-Припятское плечо

отложения. Девонские породы лежат в западной части территории на верхнепротерозойских образованиях, в восточной – на кристаллическом фундаменте. Выше отложений каменноугольного возраста присутствуют образования перми и всех геологических систем мезозоя и кайнозоя. Глубинными разломами прогиб расчленен на многочисленные ступени, горсты, грабены, погребенные выступы. По поверхности фундамента в составе прогиба выделяются *Припятский грабен* и *Северо-Припятское плечо*, примыкающее с севера к восточной части грабена.

*Подляско-Брестская впадина* находится в юго-западной части Беларуси и в соседних районах Польши. На территории нашей страны глубина кристаллического фундамента изменяется от 0,5 до 2 км. Основная часть чехла впадины сложена породами венда, кембрия, ордовика, силура. На крайнем юго-западе Беларуси Подляско-Брестская впадина граничит с *Луковско-Ратновским горстом*, отделяющим ее от *Волынской моноклинали*.

*Оршанская впадина* занимает почти всю северо-восточную четверть территории Беларуси и выходит за границы страны. Глубина залегания фундамента здесь достигает почти 2 км. На территории впадины повсеместно распространены рифейские, вендские и девонские образования. Между девонской толщей и сплошным четвертичным покровом местами присутствуют маломощные отложения юры и мела.

*Латвийская седловина*, соединяющая Белорусскую антеклизу с Балтийским щитом, заходит на территорию Беларуси своей южной частью на небольшом участке. Фундамент залегает здесь на глубине 0,7–1,0 км. Платформенный чехол седловины в основном представлен девонскими и четвертичными образованиями.

*Полесская седловина* располагается между Припятским прогибом и Подляско-Брестской впадиной. Кровля фундамента находится на глубинах от 0,3 до 1 км. Чехол седловины сложен образованиями верхнего протерозоя, мезозоя и кайнозоя. Далеко на восток от Полесской седловины в виде структурного носа заходит Микашевичско-Житковичский выступ фундамента, на котором лежит очень маломощная (в среднем 20 м) толща осадочных пород.

*Жлобинская седловина* разделяет Припятский прогиб и Оршанскую впадину. Фундамент в пределах седловины залегает на глубинах 0,6–1,1 км. Основная часть разреза чехла приходится на верхнепротерозойские и девонские породы; выше залегают юрские, меловые и более молодые отложения.

*Брагинско-Лоевская седловина* находится между Припятским и расположенным на территории Украины Днепровско-Донецким прогибами. Глубина залегания фундамента 0,5–2 км. На седловине присутствуют девонские, каменноугольные и более молодые отложения.

*Балтийская синеклиза*, расположенная в основном за пределами Беларуси, заходит лишь в крайнюю северо-западную часть территории нашей страны. В чехле белорусской части синеклизы, мощность которого достигает 0,5 км, доминируют отложения кембрия, ордовика и силура.

*Воронежская антеклиза* незначительно заходит на юго-восток Беларуси своей западной частью. Чехол представлен отложениями верхнего протерозоя, девона, мезозоя и кайнозоя общей мощностью от 0,5 до 1 км.

В большей или меньшей степени изотопно-геохимическим изучением охвачены отложения рифея, венда, всех геологических систем палеозоя и мезозоя (за исключением триаса) и квартера. С учетом существенного различия в строении, составе, генезисе и методологии изучения континентальных отложений квартера и более древних, в подавляющем большинстве морских образований, монография состоит из двух частей, одна из которых посвящена результатам изучения дочетвертичной (А. А. Махнач, Б. Г. Покровский), другая — четвертичной части (Н. А. Махнач) платформенного чехла.

Исходным каменным материалом при изучении дочетвертичных отложений в основном был керн скважин. Использовались также образцы пород, собранные в доломитовом карьере и соляных шахтах. Пробы вторичных минералов



были получены путем ручного отбора из трещин, каверн и гнезд в породах. Акцессорные минералы каменной соли, сильвинита и карналлита выделялись путем растворения в дистиллированной воде представительных образцов пород и последующего отбора мономинеральных фракций из водонерастворимого остатка с применением бинокулярного микроскопа и тяжелых жидкостей.

При изучении изотопии четвертичной толщи основное внимание было уделено образованиям позднего плейстоцена и голоцена. Керна озерных отложений извлекался русским озерным буром. Карбонатные туфы и отложения палеоозер опробовались из береговых обнажений, а из более глубоких частей залежей – русским торфяным буром. Аутигенные карбонаты почв и подпочвенной части четвертичных терригенных толщ отбирались из шурфов, естественных и искусственных обнажений. Коллекция исследованных образцов включала также арагонитовые раковины современных озерных и речных моллюсков и кальцитовые сталактиты на бетонных сооружениях.

Главным образом исследовались изотопы углерода ( $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ ) и кислорода ( $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) в карбонатах и серы ( $^{34}\text{S}/^{32}\text{S}$ ) в сульфатах, в гораздо меньшей степени – изотопы серы в сульфидах и кислорода в кварце и сульфатах. Масс-спектрометрический анализ выполнялся в основном в лаборатории литогидрогеохимии Института геохимии и геофизики НАН Беларуси, Минск (аналитики И. Л. Колосов, В. М. Колковский, О. В. Деменева) и лаборатории геохимии изотопов и геохронологии Геологического института РАН, Москва (Б. Г. Покровский, О. Л. Петров). Единичные партии проб были проанализированы во Всероссийском научно-исследовательском геологическом институте, Санкт-Петербург (Г. М. Ефремов, Т. В. Иванова), в Университете науки и технологий в Кракове (Т. Куц, М. Дулиньски), Университете им. М. Кюри-Склодовской в Люблине (С. Халас).

Изотопные отношения углерода ( $\delta^{13}\text{C}$ ) и в подавляющем большинстве случаев кислорода ( $\delta^{18}\text{O}$ ) в карбонатном материале даны относительно стандарта PDB, серы ( $\delta^{34}\text{S}$ ) в сульфатах и сульфидах – относительно стандарта CDT, кислорода в кварце, сульфатных минералах и растворах – относительно стандарта SMOW. Редкие случаи, когда результаты определения изотопных отношений кислорода в карбонатах приведены к стандарту SMOW, специально оговорены.

Точность (воспроизводимость) изотопных определений, использованных в работе, в большинстве случаев находится в пределах  $\pm 0,2\text{‰}$ ; значения  $\delta^{18}\text{O}$  в кварце определены с точностью  $\pm 0,5\text{‰}$ .

Важное значение при изотопно-геохимических исследованиях имели сопровождающие методы. Петрографические шлифы изучались авторами; химический, атомно-абсорбционный, рентгеновский, эмиссионный спектральный и электронно-микроскопический анализы выполнялись в специализированных лабораториях Института геохимии и геофизики НАН Беларуси и Института геологии Министерства природных ресурсов и охраны окружающей среды Республики Беларусь.

---

Для позднеплейстоценовых и голоценовых отложений активно использовались палинологические данные и радиоуглеродные датировки. Пыльцевой анализ выполнен главным образом В.П. Зерницкой, в меньшей степени — Г.И. Симаковой (Институт геохимии и геофизики НАН Беларуси). Радиоуглеродный анализ по органическому веществу и карбонатному материалу производился в Институте геохимии и геофизики НАН Беларуси (В.М. Колковский, Г.И. Лучина, И.Д. Павлова) и в Киевской радиоуглеродной лаборатории (Н.Н. Ковалюх, В.В. Скрипкин).

Авторы выражают благодарность за разнообразную помощь названным выше ученым и специалистам, другим белорусским коллегам, работавшим в изотопно-геохимическом и поддерживающих направлениях (Н.Д. Михайлову, Л.Ф. Гулису, С.А. Кручеку, А.В. Матвееву, Г.Д. Стрельцовой, В.М. Шимановичу, А.Г. Лапцевич, О.Ф. Кузьменковой, Н.С. Яковлевой, В.Ю. Обуховской, Л.А. Каримовой, Д.П. Плаксу, Т.Ф. Саченко, Я.Г. Грибику, С.В. Демидовой, Н.Ю. Денисовой, Н.В. Глаз, С.И. Гримус, Т.В. Макаренко), а также О.В. Мурашко, выполнившей большую техническую работу при подготовке монографии.

Мы признательны академику НАН Беларуси А.В. Матвееву (Институт природопользования НАН Беларуси) и академику РАЕН Я.Э. Юдовичу (Институт геологии Коми НЦ УрО РАН), сделавшим ряд полезных замечаний при рецензировании монографии, а также профессору Иерусалимского университета И. Колодны, профессору Польского геологического института Т.М. Периту и доктору геолого-минералогических наук В.Н. Кулешову (Геологический институт РАН) за поддержку изотопно-геохимических исследований в Беларуси.



## ОГЛАВЛЕНИЕ

<b>Введение.....</b>	<b>3</b>
<b>Часть первая. ДОЧЕТВЕРТИЧНЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ</b>	
<b>Глава 1. Изотопная хемотратиграфия.....</b>	<b>10</b>
1.1. Изотопы углерода – маркеры средне- и верхнерифейских отложений Во- лыно-Оршанского палеопрогиба .....	10
1.2. Вариации изотопного состава углерода, кислорода и серы в силурийских отложениях.....	18
1.2.1. Западные склоны Белорусской антеклизы.....	19
1.2.2. Волинская моноклиналь.....	35
1.3. Вариации изотопного состава углерода, кислорода и серы в нижне-средне- девонских отложениях.....	45
1.3.1. Зона сочленения Оршанской впадины и Жлобинской седловины .....	46
1.3.2. Жлобинская седловина.....	60
1.4. Вариации изотопного состава серы и кислорода сульфата морской воды в среднем и позднем девоне (на материале белорусских и украинских объектов).....	73
1.5. Вариации изотопного состава углерода и кислорода в верхнефаменских сланцевосных отложениях Припятского прогиба .....	77
1.5.1. Литология.....	78
1.5.2. Геохимия изотопов .....	81
1.6. Вариации изотопного состава углерода и кислорода в верхнемеловых отло- жениях на юго-востоке Беларуси .....	91
<b>Глава 2. Изотопные индикаторы обстановок седиментогенеза .....</b>	<b>98</b>
2.1. Изотопы углерода и кислорода – индикаторы условий позднедевонского галоге́неза в Припятском прогибе .....	98
2.1.1. Изотопная индикация разнообразия обстановок солеобразования .....	99
2.1.2. Изотопы углерода и химический состав акцессорных карбонатов в солях на отрезке эвапоритового процесса от галитовой к карналлитовой стадии.....	114
2.1.3. Изотопы кислорода и температура образования акцессорных кальцита, доломита и кварца в солях.....	119
2.2. Изотопы серы в бассейнах с эвапоритами хлоридного и сульфатного типов (Припятский прогиб и Прикаспийская впадина).....	128
2.3. Изотопы серы как индикаторы возраста и условий формирования пермской эвапоритовой толщи Припятского прогиба.....	140
2.4. Изотопы углерода и кислорода и условия образования франских горючих сланцев в кальдерах диатрем на Жлобинской седловине .....	143
2.5. Изотопы углерода и кислорода в мелководных и депрессионных межсо- ловых нижнефаменских отложениях Припятского прогиба .....	147
2.6. Изотопы кислорода и углерода – индикаторы условий седиментации визей- ских отложений на юго-западе Беларуси (Волинская моноклиналь) .....	150
	371

<b>Глава 3. Изотопные индикаторы обстановок диагенеза.....</b>	<b>155</b>
3.1. Изотопы углерода и кислорода – индикаторы условий образования карбонатных конкреций и пород желваковой фации в верхнедевонской толще Припятского прогиба.....	155
3.1.1. Литологическая характеристика объектов изучения .....	156
3.1.2. Изотопный состав углерода и кислорода «бессульфидных» и сульфидсодержащих конкреций .....	163
3.1.3. Распределение значений $\delta^{13}\text{C}$ и $\delta^{18}\text{O}$ внутри конкреций .....	166
3.1.4. Природа желваковой литофации: конкреции или деформированные слои? .....	168
3.2. Изотопы серы сульфидных конкреций в угленосных отложениях карбона и юры Беларуси – индикаторы условий торфообразования .....	170
<b>Глава 4. Изотопные индикаторы обстановок катагенеза.....</b>	<b>175</b>
4.1. Изотопы углерода и кислорода в карбонатных минералах из трещин и каверн в межсолевых и подсолевых девонских отложениях Припятского прогиба как индикаторы элизионного катагенеза .....	175
4.2. Изотопы кислорода в прожилковых карбонатах и карбонатных породах области развития позднедевонского магматизма на северо-востоке Припятского прогиба .....	184
4.3. Изотопы углерода и кислорода в кальците из трещин и каверн в девонских отложениях Северной и Средней Беларуси как индикаторы инфильтрационного катагенеза .....	193
4.4. Изотопы серы в сульфатных минералах как индикаторы галокатагенеза .....	211
4.4.1. Верхнепротерозойско-среднедевонские отложения Северной и Средней Беларуси .....	212
4.4.2. Специфика бассейнов с эвапоритами хлоридного и сульфатного типов: Припятский прогиб и Прикаспийская впадина .....	220
<b>Часть вторая. ЧЕТВЕРТИЧНЫЕ ОТЛОЖЕНИЯ</b>	
<b>Глава 5. Объекты, пункты и фактический материал исследований.....</b>	<b>230</b>
<b>Глава 6. Теоретические представления о фракционировании изотопов кислорода и углерода в процессах пресноводного континентального карбонатообразования.....</b>	<b>237</b>
<b>Глава 7. Возможности изотопной индикации обстановок четвертичного осадкообразования по индивидуальным образцам и фрагментарным «архивам» .....</b>	<b>242</b>
<b>Глава 8. Изотопная индикация палеоклиматических событий позднего плейстоцена–голоцена.....</b>	<b>254</b>
8.1. Традиционные представления о палеоклимате позднего плейстоцена и голоцена.....	254
8.2. Реконструкция климатических условий по изотопным данным .....	256
8.3. Изотопы, палеоклимат и хроностратиграфическая схема позднеледниковья–голоцена .....	273
8.4. Приемы индикации палеоклиматических обстановок, основанные на интерпретации трендов в вертикальных профилях $\delta^{18}\text{O}$ и $\delta^{13}\text{C}$ .....	277

<b>Глава 9. Изотопная индикация гидрологического режима позднеледниково-голоценовых озерных водоемов.....</b>	<b>282</b>
<b>Глава 10. Изотопная индикация трофического режима позднеледниково-голоценовых озерных водоемов.....</b>	<b>290</b>
10.1. Традиционные методы оценки динамики эвтрофирования.....	291
10.2. Известные модели фракционирования изотопов при карбонатообразовании в процессе эвтрофирования водоемов.....	292
10.3. Индикация изменений трофического статуса и газового режима озера Сергеевского.....	294
10.4. Индикация трофического статуса водоемов на основании исследования раковин современных моллюсков.....	297
<b>Глава 11. Сравнительный анализ информативности изотопных и других индикаторов палеогеографических событий и обстановок в позднеледниковье-голоцене .....</b>	<b>307</b>
11.1. Отражение надрегиональных событий в изотопных, литохимических и палинологических «архивах» информации.....	308
11.1.1. Позднеледниковый стадиал и его «окрестности».....	308
11.1.2. Холодное событие 8200 календарных лет назад.....	310
11.1.3. Климатический оптимум голоцена.....	312
11.2. Общая палеоклиматическая информация, заключенная в динамике изотопных показателей и содержаний пыльцы <i>Picea</i> и <i>Alnus</i> .....	314
11.3. Сопоставление корреляционных моделей, основанных на анализе изотопных кривых и палинологических событий.....	316
<b>Глава 12. Надрегиональная модель взаимосвязи отношений <math>^{18}\text{O}/^{16}\text{O}</math> и <math>^{13}\text{C}/^{12}\text{C}</math> с характеристиками обстановок карбонатообразования .....</b>	<b>320</b>
12.1. Отношение $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ и температура воздуха.....	328
12.2. Отношение $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ и степень искажения воздушно-температурного изотопно-кислородного сигнала .....	330
12.3. Отношение $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ и степень проточности водоемов-карбонатонакопителей ...	332
<b>Глава 13. Изотопная оценка масштабов депонирования атмогенного и органического углерода в четвертичной толще.....</b>	<b>336</b>
13.1. Взаимодействие «вода-карбонатные минералы» и проблема долговременного депонирования атмогенного и органического углерода .....	336
13.2. Соотношение $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ в карбонатах и депонирование углерода различного генезиса.....	338
13.2.1. Педогенные карбонаты.....	338
13.2.2. Карбонаты подпочвенной части четвертичных отложений.....	341
13.2.3. Озерные и источниковые карбонаты.....	342
13.2.4. Натечные карбонатные образования на бетонных сооружениях.....	343
13.3. Соотношение $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$ в подземных водах и сток атмо-биогенного углерода ...	344
<b>Заключение .....</b>	<b>348</b>
<b>Список использованных источников.....</b>	<b>351</b>