

**ГЛОБАЛЬНЫЙ
БИОГЕОХИМИЧЕСКИЙ
ЦИКЛ СЕРЫ
И ВЛИЯНИЕ
НА НЕГО
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
ЧЕЛОВЕКА**



ИЗДАТЕЛЬСТВО СЕРВИС

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ИНСТИТУТ БИОХИМИИ
И ФИЗИОЛОГИИ МИКРООРГАНИЗМОВ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ КОМИТЕТ
СКОПЕ (МСНС)

**ГЛОБАЛЬНЫЙ
БИОГЕОХИМИЧЕСКИЙ
ЦИКЛ СЕРЫ
И ВЛИЯНИЕ
НА НЕГО
ДЕЯТЕЛЬНОСТИ
ЧЕЛОВЕКА**

Под общей редакцией и с предисловием
академика Г. К. СКРЯБИНА

Ответственные редакторы:

член-корреспондент АН СССР М. В. ИВАНОВ (СССР),
доктор Дж. Р. ФРЕНЕЙ (Австралия)



ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
МОСКВА 1983

Глобальный биогеохимический цикл серы и влияние на него деятельности человека. М.: Наука, 1983. 424 с.

В монографии обобщены данные по содержанию различных серных соединений в литосфере, гидросфере и атмосфере, рассмотрены основные процессы биологического, геохимического и антропогенного круговорота серы, впервые в мировой литературе количественно охарактеризованы основные потоки природного круговорота серы и влияние на него деятельности человека. Показано, что за счет деятельности человека размеры основных потоков серы в атмосферу и гидросферу удвоились.

Книга рассчитана на биологов, геологов, геофизиков, океанологов и почвоведов, интересующихся проблемами круговорота веществ и георетическими вопросами рационального использования и охраны окружающей среды.

Табл. 136. Ил. 132. Библиогр. на 48 с.

Коллектив авторов:

СССР — И. И. ВОЛКОВ, В. А. ГРИНЕНКО, М. В. ИВАНОВ,
А. Ю. ЛЕИН, А. А. МИГДИСОВ,
А. Л. РАБИНОВИЧ, А. Г. РОЗАНОВ, А. Б. РОНОВ, А. Г. РЯБОШАПКО;
АВСТРАЛИЯ — Дж. Р. ФРЕНЕЙ, К. Х. ВИЛЬЯМС

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ ВИЦЕ-ПРЕЗИДЕНТА МЕЖДУНАРОДНОГО СОВЕТА НАУЧНЫХ СОЮЗОВ	5
ПРЕДИСЛОВИЕ РУКОВОДИТЕЛЯ ПРОЕКТА СКОПЕ ПО БИОГЕОХИ- МИЧЕСКИМ ЦИКЛАМ	7
ВВЕДЕНИЕ	9

Глава 1

ОСНОВНЫЕ РЕАКЦИИ ГЛОБАЛЬНОГО БИОГЕОХИМИЧЕСКОГО ЦИКЛА СЕРЫ

В. А. Гриненко, М. В. Иванов

1.1. Низкотемпературные химические реакции глобального цикла серы . . .	12
1.2. Высокотемпературные реакции геохимического цикла серы	14
1.3. Биологические процессы образования и разложения сероорганических соединений	15
1.4. Аэробное окисление серных соединений микроорганизмами	16
1.5. Анаэробное окисление восстановленных соединений серы	17
1.6. Анаэробное восстановление сульфата микроорганизмами (диссимильтор- ная сульфатредукция)	18
1.7. Изотопный состав природной серы и основные процессы фракционирова- ния ее стабильных изотопов	19
Литература	26

Глава 2

КРУГОВОРОТ СЕРЫ В ЛИТОСФЕРЕ

Часть 1

РЕЗЕРВУАР СЕРЫ В ОСАДОЧНОЙ ОБОЛОЧКЕ И В ЗЕМНОЙ КОРЕ

А. А. Мигдисов, В. А. Гриненко, А. Б. Роцов

2.1. Сера в осадочной оболочке материков	32
2.1.1. Резервуар серы в осадочной оболочке платформенных зон	32
2.1.2. Сера в осадочных породах геосинклинальных зон	62
2.1.3. Сера в осадочных породах континентального сектора Земли	74
2.1.4. Сера в осадочной оболочке океанического сектора земной коры	81
2.1.5. Оценка резервуара серы в осадочной оболочке Земли в целом	82
2.2. Сера в породах «гранитного» слоя коры континентов	82
2.3. Сера в базальтовом слое коры континентов	85
2.4. Сера в породах океанического сектора земной коры	85
2.5. Резервуар серы в породах земной коры в целом	86

Часть 2

ЦИКЛ СЕРЫ В ПОРОДАХ ЗЕМНОЙ КОРЫ

А. Ю. Леин

2.6. Краткая характеристика резервуара серы в земной коре	87
2.7. Поток серы из мантии	89
2.8. Поток серы при процессах наземного вулканизма	90
2.8.1. Оценка потока вулканической серы различными авторами	91
2.8.2. Эмиссия серы на стадии фумарольной активности вулканов	92
2.8.3. Эмиссия серных газов при извержении вулканов	94
2.9. Потоки серы при природных процессах денудации континентов	95
2.9.1. Планетарный денудационный баланс минерального вещества суши	96
2.9.2. Масса серы в природном денудационном потоке	99
2.9.3. Масса серы, поступающей на поверхность континентов	100
2.10. Содержание и масса серы в антропогенном денудационном потоке вещества с континентов	101
2.10.1. Масштабы антропогенной денудации континентов	101
2.10.2. Общая величина антропогенной денудации континентов	102
2.10.3. Вклад антропогенной серы в денудационные потоки вещества из литосферы	103
2.10.4. Извлечение серы при сгорании топлива и в металлургических процессах	104
2.11. Общий поток серы при денудационных процессах и доля антропогенной серы в этом потоке	106
2.12. Поток серы из литосферы при сжигании жидкого и газообразного топлива	106
2.13. Баланс серы в литосфере	106
Литература	107

Глава 3

КРУГОВОРОТ СЕРЫ В ПОЧВЕ

Дж. Френей, Ч. Уильямс (Австралия)

3.1. Природный круговорот серы в почве	114
3.1.1. Формы серы в почве	114
3.1.2. Географическое распределение серы в почвах мира	121
3.1.3. Превращения соединений серы в почве	123
3.1.4. Потери серы из почвы при выщелачивании и эрозии	135
3.2. Воздействие человека на цикл серы в почве	136
3.2.1. Сельскохозяйственное производство и круговорот серы в почве	136
3.2.2. Кислые осадки	149
3.2.3. Влияние угольных и минеральных разработок на почвы	151
3.3. Баланс серы в педосфере	152
Литература	153

Глава 4

АТМОСФЕРНЫЙ ЦИКЛ СЕРЫ

А. Г. Рябошапко

4.1. Концентрации и общее содержание серосодержащих веществ в атмосфере	170
4.1.1. Концентрации восстановленных соединений серы	171
4.1.2. Концентрации двуокиси серы	176
4.1.3. Концентрации сульфатов	183
4.1.4. Общее содержание соединений серы	190
4.1.5. Стратосферный сульфатный слой	192
4.2. Источники атмосферной серы	195

4.2.1. Биогенная эмиссия в прибрежных районах и в открытом океане	196
4.2.2. Биогенная эмиссия на суше	198
4.2.3. Эоловое выветривание сульфатов с поверхности континентов	199
4.2.4. Эмиссия сульфатов морской соли из океанов — А. Г. Рябошапко, А. Г. Розанов	204
4.2.5. Антропогенная эмиссия — А. Г. Рябошапко	207
4.3. Процессы выведения серы из атмосферы	210
4.3.1. Окисление восстановленных соединений серы в атмосфере	211
4.3.2. Окисление двуокиси серы в атмосфере	212
4.3.3. Вымывание соединений серы осадками	214
4.3.4. Концентрации серы в осадках	217
4.3.5. Поглощение двуокиси серы подстилающей поверхностью	223
4.3.6. Поглощение сульфатов подстилающей поверхностью	225
4.4. Атмосферный баланс серы	227
4.4.1. Баланс серы в атмосфере промышленных регионов	228
4.4.2. Баланс серы в континентальной запыленной атмосфере	229
4.4.3. Баланс серы в чистой континентальной атмосфере	229
4.4.4. Баланс серы в океанической атмосфере	230
4.4.5. Глобальный баланс серы в атмосфере на начало 80-х годов	232
4.4.6. Глобальный баланс серы в атмосфере в прединдустриальную эпоху	234
4.4.7. Изотопный состав серы в атмосфере — В. А. Гриненко	236
Литература	243

Глава 5

КРУГОВОРОТ СЕРЫ В КОНТИНЕНТАЛЬНЫХ ВОДОЕМАХ

Часть I

КРУГОВОРОТ СЕРЫ В ОЗЕРАХ И ВОДОХРАНИЛИЩАХ

М. В. Иванов

5.1. Круговорот серы в пресноводных гомомиктических озерах	256
5.2. Круговорот серы в меромиктических озерах	264
5.3. Влияние деятельности человека на круговорот серы в континентальных водоемах	267
5.3.1. Повышение концентрации сульфатов и сероводорода в водной толще озер	268
5.3.2. Накопление восстановленной серы в илах озер под влиянием антропогенного загрязнения и евтрофикации	270
5.3.3. Круговорот серы в водохранилищах	272
5.3.4. Повышение содержания сульфатов и подкисление озерной воды как результат выпадения кислых атмосферных осадков	274
5.4. Расчет потока серы, извлекаемой из глобального цикла при биогеохимических процессах в континентальных водоемах	278
5.4.1. Поток серы в донные отложения пресных озер и водохранилищ	278
5.4.2. Поток серы в областях внутреннего стока	278

Часть 2

ПОТОК СЕРЫ С КОНТИНЕНТОВ В ОКЕАН

М. В. Иванов, В. А. Гриненко, А. Л. Рабинович

5.5. Поток серы с речным и подземным стоком	281
5.5.1. Потоки природной серы в речном стоке	281
5.5.2. Поток серы с подземными водами	286
5.5.3. Потоки антропогенной серы	287
5.5.4. Суммарный поток серы в составе речного и подземного стока	289

5.6. Изотопный состав серы сульфатов речного стока	289
5.6.1. Вариабельность изотопного состава серы по течению рек	289
5.6.2. Сезонные вариации содержания и изотопного состава сульфатов речного стока	293
5.6.3. Количественная и изотопная характеристика стока сульфатов с территории СССР	295
5.7. Основные источники серы в составе речного стока и расчет количества сульфатной серы, образующейся при процессах выветривания горных пород	297
Литература	298

Глава 6

ЦИКЛ СЕРЫ В ОКЕАНЕ

Часть 1

РЕЗЕРВУАРЫ И ПОТОКИ СЕРЫ

И. И. Волков, А. Г. Розанов

6.1. Поступление серы в океан	302
6.2. Сера в воде Мирового океана	304
6.2.1. Сульфатная сера	304
6.2.2. Сероводород	305
6.2.3. Биогенный круговорот серы в воде Мирового океана	305
6.3. Условия выведения серы в донные осадки	306
6.3.1. Формы выведения серы в осадки	306
6.3.2. Массы осадочного материала и закономерности его распределения на дне океана	307
6.3.3. Влажность донных отложений	308
6.3.4. Распределение органического вещества в осадках	308
6.4. Поток сульфатов из воды в донные отложения	312
6.4.1. Сульфаты иловой воды	312
6.4.2. Сульфаты в твердой фазе осадков	313
6.4.3. Сульфаты в биогенных морских карбонатах	318
6.4.4. Сера барита	319
6.4.5. Сера гипса	321
6.4.6. Суммарный поток серы сульфатов в донные отложения	321
6.5. Образование и захоронение в осадках восстановленных форм серы	322
6.5.1. Распространение и геохимическая активность сульфатредуцирующих бактерий — М. В. Иванов	322
6.5.2. Основные черты распределения восстановленных форм серы — И. И. Волков, А. Г. Розанов	335
6.5.3. Сумма восстановленных форм серы и ее состав в современных осадках	344
6.5.4. Соотношение между ΣS_{H_2S} и содержанием органического вещества в осадках	347
6.5.5. Исходное содержание серы сульфатов в иловой воде и величина ΣS_{H_2S}	352
6.5.6. Накопление восстановленной серы в осадках с различной скоростью седиментации	356
6.5.7. Факторы, ограничивающие накопление восстановленных форм серы в осадках	357
6.5.8. Внутренний круговорот серы в донных осадках	364
6.5.9. Ежегодное накопление восстановленной серы в осадках океана	365
6.6. Накопление серы в осадках морских водоемов с высокой скоростью процессов сульфатредукции — А. Ю. Ленин, М. В. Иванов	366
6.6.1. Черное море	367
6.6.2. Азовское море	369
6.6.3. Балтийское море	370

6.6.4. Калифорнийский залив	373
6.6.5. Поток серы в осадки внутриконтинентальных морей	373
6.7. Суммарный поток серы в донные осадки и элементы баланса ее в Мировом океане — И. И. Волков, А. Г. Розанов	375

Часть 2

ИЗОТОПНЫЙ БАЛАНС СЕРЫ ОКЕАНИЧЕСКИХ ОСАДКОВ

А. Ю. Ленин, В. А. Гриненко, А. А. Мигдисов

6.8. Основные закономерности фракционирования стабильных изотопов серы при бактериальной редукции сульфатов	377
6.9. Изотопный состав соединений серы в восстановленных осадках малых средиземных морей	381
6.10. Изотопный состав серных соединений в осадках Калифорнийского залива	385
6.11. Изотопный состав соединений серы в океанических осадках	386
6.12. Основные закономерности распределения изотопов серы в морских и океанических осадках	390
6.13. Материально-изотопный баланс серы в осадках Тихого океана	392
6.14. Расчет материально-изотопного баланса серы в осадках Мирового океана	393
Литература	394

Глава 7

ОСНОВНЫЕ ПОТОКИ

ГЛОБАЛЬНОГО БИОГЕОХИМИЧЕСКОГО ЦИКЛА СЕРЫ

М. В. Иванов

7.1. Состояние вопроса	402
7.2. Глобальный цикл серы, потоки антропогенного происхождения	406
7.3. Природная сера речного стока	407
7.4. Атмосферный цикл серы	407
7.5. Круговорот серы в океане и его взаимодействие с круговоротом углерода	408
7.6. Использование изотопных данных (величин $\delta^{34}\text{S}$) для идентификации источников природной и антропогенной серы	410
7.7. Прогноз изменения глобального биогеохимического цикла серы под влиянием деятельности человека	411
Литература	412

ПРИЛОЖЕНИЕ

Состав рабочей группы советских ученых по подготовке доклада по проекту СКОПЕ «Глобальный биогеохимический цикл серы»	414
Состав Международного научного совещательного комитета по проекту СКОПЕ «Глобальный биогеохимический цикл серы»	414
Список участников Международного рабочего совещания СКОПЕ/ЮНЕП «Глобальный биогеохимический цикл серы», Пущино, 15—19 октября 1979 г.	415
Список членов Редакционного совета по докладу СКОПЕ/ЮНЕП «Глобальный биогеохимический цикл серы»	416