

# СООТНОШЕНИЕ БИОТИЧЕСКИХ И АБИОТИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ТОРФЯНЫХ И САПРОПЕЛЕВЫХ ОТЛОЖЕНИЙ

**Н.Н. Бамбалов**

Институт проблем использования природных ресурсов и экологии НАН Беларуси, г. Минск

Эл. почта: [peatland@ns.ecology.ac.by](mailto:peatland@ns.ecology.ac.by)

Статья получена редакцией 01.03.2013; принята к печати 13.05.2013

Рассмотрены стадии и этапы формирования торфяных и сапропелевых отложений. Сравнение биосферных процессов, обуславливающих формирование торфяных и сапропелевых отложений, выявило общие принципы их образования и развития. Стадии седиментогенеза в озерах соответствует стадия надземного преобразования отмерших растений-торфообразователей. Торф формируется в верхнем, торфогенном слое торфяной залежи с преобладанием аэробных процессов над анаэробными, а сапропель – в верхнем слое сапропелевой залежи – пелогене, где также преобладают аэробные процессы над анаэробными. В торфяных залежах ниже торфогенного слоя находится зона консервации и медленных вторичных изменений торфа в анаэробных условиях. Точно так же в сапропелевых залежах ниже пелогена находится зона консервации и медленных вторичных изменений сапропеля в анаэробных условиях. Наличие этих принципиально различных зон в торфяных и сапропелевых залежах с границами раздела между ними по линии начала полного анаэробноза в совокупности с незамкнутостью годового биоцикла углерода и азота обеспечивает переход вещества из биогенного круговорота в геологический. В биогенном круговороте торф и сапропель находятся не более нескольких сотен лет, в то время как в геологическом – тысячи, десятки и сотни тысяч лет (последнее относится к межледниковым отложениям). Поставлен вопрос о целесообразности замены термина «пелоген» термином «пелогенный слой» (по аналогии с термином «торфогенный слой»).

**Ключевые слова:** органическое вещество, торф, сапропель, биогенный круговорот, геологический круговорот.

## RELATIONSHIPS BETWEEN BIOTIC AND ABIOTIC PROCESSES IN PEAT AND SAPROPEL SEDIMENTS FORMATION

**N.N. Bambalov**

Institute for Nature Management of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, the Republic of Belarus

E-mail: [peatland@ns.ecology.ac.by](mailto:peatland@ns.ecology.ac.by)

Stages and phases in the formation of peat and sapropel sediments are compared to reveal their common and distinct features. Sediment formation in lakes corresponds to the overground transformation of died-off peat-forming plants. Peat is formed in the upper layer of a peat bed where aerobic process dominate over anaerobic ones, whereas sapropel is formed in the upper layer of sapropel bed, which termed pelogen, where aerobic process are predominant, too. In the peat beds below the peat-forming layer, the conservation zone is located, where slow secondary process of peat transformation take place under anaerobic conditions. A similar zone is located below the pelogenic layer of a sapropel bed. The presence of these two radically different zones and an interfaces between them in each of the two types of sediments in combination with nonclosed annual carbon and nitrogen cycles provides for net matter flux from the biological to geological turnover. The time scale of the biological turnover of matter in peat and sapropel is about several hundreds years, whereas that of the geological turnover amounts to tens and hundreds thousand years (the latter timescale relates to interglacial sediments).

**Keywords:** organic matter, peat, sapropel, biological turnover, geological turnover.

### Введение

Торфяные и сапропелевые отложения являются продуктом эволюции биосферы и ее неотъемлемой частью. Болота и те озера, в которых накапливается сапропель, выполняют весьма важные биосферные функции: аккумулятивную, биологическую, межкугворотную, ландшафтную, газорегуляторную, геохимическую, гидрологическую и климатическую [2]. Первые четыре функции являются незаменимыми, то есть такими, которые присущи только болотам, и никакие экосистемы на суше: леса, луга, степи, сельскохозяйственные угодья – не способны их выполнять. Не ставя задачей рассмотрение всех вышеуказанных функций, обратим внимание лишь на те из них, которые связаны с особенностями процессов образования торфяных и сапропелевых отложений.

Аккумулятивная функция болот и озер относится к категории незаменимых, так как только в них образуются и аккумулируются торф и сапропель, которые нигде больше не накапливаются. Качество и скорость аккумуляции торфа и сапропеля зависят от комплекса физико-географических и геохимических факторов, в которых происходит их формирование. В полосе умеренного климата, например на территории Беларуси, в голоцене сформировались отложения торфа с глубиной до 9,0 м, а сапропеля – до 18 м, в Греции, в более теплом климате, где не было оледенений в четвертичном периоде, имеется болото со слоем торфа 35 м.

Вместе с аккумуляцией торфа или сапропеля происходит аккумуляция энергии и биогенных химических элементов – углерода, кислорода, водорода, азота, серы, фосфора, кальция, магния, железа и многих

других элементов, входящих в состав торфообразователей или сапропелеобразователей.

Гидрологическая и водно-аккумулятивная роль озер вполне очевидна и не требует пояснений. Торфяные болота также являются мощными аккумуляторами воды благодаря высокой влагоемкости торфа, от 650 до 3000% по отношению к сухой массе. В среднем влажность торфяных залежей составляет 90–92%, следовательно, на каждую тонну сухого вещества приходится 9,0–11,5 т воды, поэтому фактически болота представляют собой водоемы, заполненные полуразложившимися растительными остатками в виде торфа.

Торфяные и сапропелевые месторождения в естественном состоянии обеспечивают переход химических элементов из биогенного круговорота в геологический, а в осушенном состоянии – наоборот, из геологического круговорота в биогенный, поэтому неосушенные болота выводят из атмосферы диоксид углерода, а из осушенных он в нее поступает. На территории Беларуси среднегодовая аккумуляция углерода в торфяных отложениях составляет от 0,15 до 0,59 т/га в зависимости от типа и вида фитоценозов, а в разных типах сапропелевых отложений – от 0,09 до 0,17 т/га. В то же время с 1 га осушенных торфяных почв в атмосферу выделяется от 1,90 до 5,72 т/га углерода за счет минерализации органического вещества торфа в зависимости от возделываемых культур – многолетних трав, зерновых, пропашных [2].

Торф и сапропель имеют биогенное происхождение и относятся к осадочным органогенным породам. Формирование современных торфяных и сапропелевых отложений под воздействием биотических и абиотических процессов началось в послеледниковый период и продолжается поныне, однако научные знания о соотношениях этих процессов систематизированы недостаточно.

Цель данной обзорной работы состоит в выявлении общих и отличительных процессов, происходя-

щих при формировании торфяных и сапропелевых отложений.

### Образование торфа

Процесс образования осадочных пород состоит из двух стадий: первая – седиментогенез, вторая – диагенез [22, 23, 33]. Стадия седиментогенеза в общегеологическом плане включает три группы процессов: мобилизацию вещества при выветривании и размыве, перенос вещества водой, льдом, ветром или под воздействием гравитации, осаждение вещества на водосборах [29, 34], после чего начинается стадия диагенеза. Под диагенезом в геологии понимается процесс преобразования осадков в осадочные породы [8, 9]. В процессе диагенеза происходит физико-химическое уравнивание сложной и неравновесной смеси исходных минеральных и органоминеральных соединений, органического вещества отмерших и живых организмов. Стадия диагенеза протекает в два этапа – окислительный и восстановительный [8, 9, 35] в зависимости от наличия свободного кислорода, растворенного в водах, заполняющих пространство между твердыми частицами осадков.

Важнейшей отличительной особенностью образования торфа является продуцирование основной части исходного материала в виде биомассы болотных растений на месте образования месторождения. Вещественный состав торфа формируется из двух основных источников: отмершие болотные растения и вещества, привносимые в болота с окружающих территорий ветром, атмосферными осадками, поверхностными и подземными водами (табл. 1), однако суммарно их доля не превышает 15%. Для разных типов болот источники и пути поступления исходных веществ для образования торфа существенно различаются: наиболее разнообразны они на пойменных низинных болотах, наименее разнообразны – на болотах верхового типа, где водно-минеральное питание представлено только атмосферными осадками.

Табл. 1

Источники и пути поступления веществ в торфяные отложения

| Источники и пути поступления веществ                         | Торфяные отложения низинного типа |                        |                            | Торфяные отложения переходного типа | Торфяные отложения верхового типа |
|--|-----------------------------------|------------------------|----------------------------|-------------------------------------|-----------------------------------|
|  | пойменного происхождения          | озерного происхождения | суходольного происхождения |                                     |                                   |
| Биомасса отмерших болотных организмов                        | +                                 | +                      | +                          | +                                   | +                                 |
| Смывание веществ с окружающих суходолов в краевые зоны болот | +                                 | +                      | +                          | –                                   | –                                 |
| Привнос веществ с атмосферными осадками                      | +                                 | +                      | +                          | +                                   | +                                 |
| Привнос веществ с паводковыми водами                         | +                                 | –                      | –                          | –                                   | –                                 |
| Привнос веществ с подземными водными потоками                | +                                 | +                      | +                          | +/-                                 | –                                 |

Применительно к процессам образования торфяных отложений стадия седиментогенеза начинается с момента отмирания болотных растений и завершается их отложением на поверхности почвы (табл. 2). На стадии седиментогенеза в формировании вещественного состава торфа помимо отмерших организмов принимают участие вещества, привнесенные с атмосферными осадками. Под влиянием антропогенного фактора эта стадия вещественного баланса материала для образования торфа систематически возрастает, особенно вблизи крупных промышленных центров. Кроме этого в краевые зоны низинных болот поступают вещества с поверхностным стоком, а в поймах рек и озер в образовании торфа принимают участие вещества, привносимые паводковыми водами. В редких случаях в образовании торфа принимает участие вулканический пепел. Однако главным исходным материалом для образования торфа всегда является биомасса отмерших растений, количество которой зависит от состава фитоценозов, наличия питательных веществ для растений и степени обводнения территории.

На стадии седиментогенеза происходят значительные изменения отмерших растений под влиянием живых организмов, главным образом беспозвоночных и аэробных микроорганизмов [1, 11, 12], поэтому на поверхности почвы отлагаются материалы, уже частично гумифицированные и потерявшие значительное количество своей первоначальной биомассы в процессе наземного биогеохимического цикла минерализации. Итогом стадии седиментогенеза является накопление на поверхности почвы исходного материала для образования торфа в виде очень сложной смеси органических, минеральных и органоминеральных веществ разного генезиса, но с подавляющим преобладанием биомассы отмерших растений.

Далее начинается аэробный этап стадии диагенеза. Применительно к торфяным месторождениям этот этап изучался многими поколениями исследователей, в результате чего была создана теория торфогенного слоя [18, 37], суть которой состоит в следующем.

На избыточно увлажненных территориях уровни грунтовых вод колеблются в зависимости от сезонов года и погодных условий, однако существует линия, ниже которой уровень воды никогда не опускается. По современным представлениям [2, 3, 30], этой линией неосушенная почва делится на две принципиально различные зоны: верхнюю, биологически деятельную, и нижнюю, биологически инертную. Если на переувлажненной территории еще нет торфяной залежи, то торфогенный слой начинает формироваться на минеральной почве и постепенно формирует торфяную залежь.

Фактически торфогенный слой представляет собой целинную торфяную почву, в которой из-за колебания уровня грунтовых вод содержание влаги переменчиво, поэтому кислород проникает в ее поры. В торфогенном слое находятся живые корневые системы болотных растений и аэробные организмы. Здесь интенсивно развиваются биологические, биогеохимические, химические, физические и физико-химические процессы накопления, окисления, минерализации и гумификации органического вещества. Из физических процессов здесь наиболее распространены измельчение растительного материала и

его медленное уплотнение. Продолжительность пребывания отмерших торфообразователей в торфогенном слое в зависимости от природных условий и скорости накопления торфа может составить от 100–200 до 400–500 лет. Этого времени достаточно для приобретения торфом его физической структуры, химического состава и свойств. При этом до 95% исходной биомассы минерализуется и лишь около 5–16% сохраняется в виде торфа [26].

Постепенно из-за неполного разложения ежегодно поступающего органического вещества формируется слой торфа, толщина которого превышает амплитуду колебаний уровня грунтовых вод, поэтому часть отложенного торфа оказывается ниже их постоянного уровня. Здесь постоянно высокое содержание влаги, поры торфа заполнены водой и не насыщаются кислородом, поэтому нет живых корней и аэробных организмов. Ниже линии постоянного уровня грунтовых вод находится бывшая торфяная почва, почти лишенная живых организмов из-за постоянного анаэробноз. Это зона консервации торфа с преобладанием геологических процессов над биологическими. В этой анаэробной зоне торф сохраняет свои основные свойства, которые приобрел в торфогенном слое, претерпевает медленные вторичные изменения и превращается в органогенную горную породу. Свидетельством медленных вторичных изменений торфа в зоне консервации является образование метана при участии анаэробных бактерий.

Ежегодно новые слои торфа переходят из торфогенного слоя в нижележащие, поэтому торфяная залежь нарастает вверх, а вместе с этим осуществляется переход химических элементов, образующих торф, из биогенного круговорота в геологический.

Таким образом, в образовании торфяных месторождений стадия седиментогенеза включает этап наземного и наземного преобразования растений-торфообразователей. В стадии диагенеза выявлены этап торфогенного слоя (аэробный этап) и этап консервации торфа с медленными вторичными изменениями его свойств в анаэробных условиях [7, 18].

Глубина торфогенного слоя обычно составляет около 0,2–0,3 м, но на больших кочках может достигать глубины 0,5–0,6 м. По мере нарастания торфяных залежей глубина торфогенного слоя остается в этих пределах независимо от продолжительности процесса торфообразования. Глубина зоны консервации ежегодно увеличивается за счет прироста торфа и перехода его в эту зону из торфогенного слоя, поэтому она может достигать многих метров и даже десятков метров в зависимости от продолжительности и условий торфообразования.

Таковы в общих чертах стадии и механизмы образования торфяных отложений на минеральных грунтах. Наряду с этим широко распространено образование торфяных месторождений путем заболачивания озер [24, 37], и в этих случаях торфяные залежи формируются на отложениях сапропеля по вышеописанному механизму с обязательным формированием биологически деятельного торфогенного слоя и биологически инертной зоны консервации. Следует добавить, что в англоязычной научной литературе термину «торфогенный слой» соответствует термин «acrotelm», а зоне консервации – «catotelm», однако англоязычные термины появились позже российских.

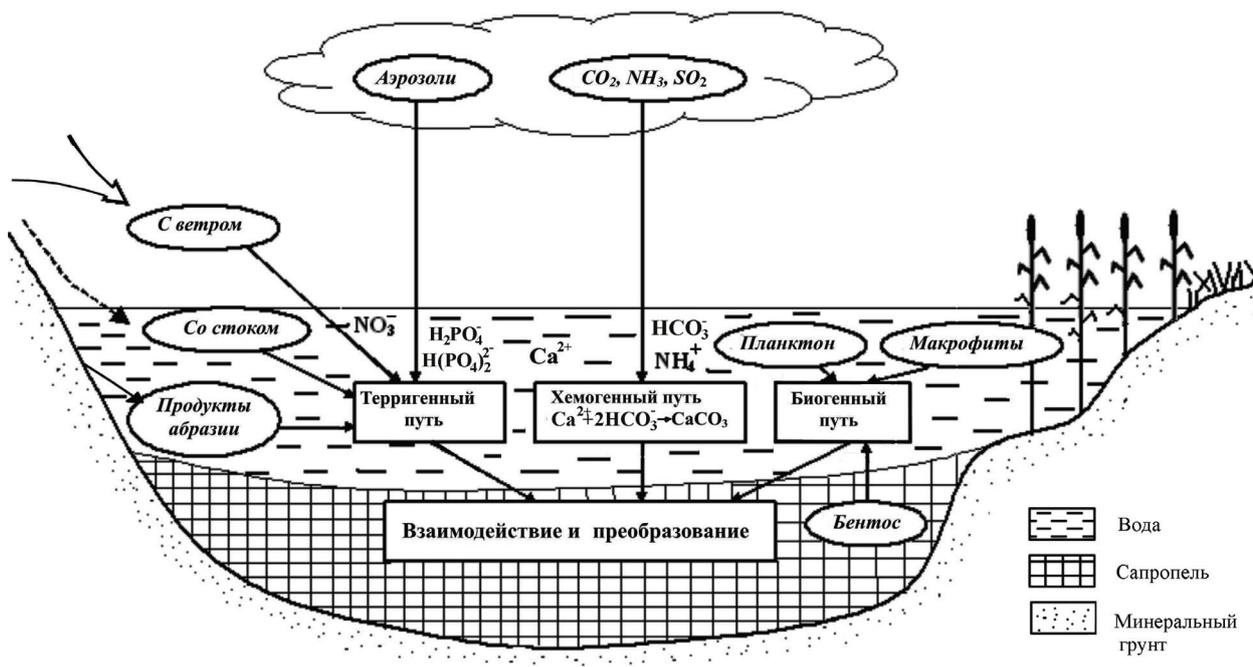
**Биотические и абиотические процессы на разных стадиях образования торфа  
(ОВ = органическое вещество)**

| Стадия образования торфа | Место и условия                            | Биотические процессы   | Абиотические процессы   |
|--------------------------|--|--|---|
| Стадия седиментогенеза   | Наземный и наземный слой, аэробные условия | Интенсивная жизнедеятельность болотных организмов.<br>Фотосинтез и продуцирование биомассы.<br>Поглощение организмами веществ из почвы, воды и атмосферы.<br>Отмирание живых организмов.<br>Измельчение отмерших растений живыми организмами.<br>Автолиз отмерших растений.<br>Биохимические процессы окисления, гумификации и минерализация отмершего ОВ. | Привнос вещества из атмосферы.<br>Привнос вещества на поверхность водными потоками (в поймах или краевых зонах).<br>Измельчение отмершей биомассы при замерзании, оттаивании и окислении.<br>Отложение отмершей биомассы на поверхности болота.   |
| Стадия диагенеза         | Окислительный этап                         | Интенсивная жизнедеятельность болотных организмов.<br>Биологическая и биохимическая деструкция ОВ.<br>Биохимическое окисление ОВ.<br>Ферментативная деполимеризация ОВ.<br>Ферментативная конденсация ОВ.<br>Гумификация ОВ.<br>Минерализация ОВ.  | Агрегирование мелких гумифицированных частиц.<br>Сорбционные взаимодействия.<br>Ионный обмен.<br>Органоминеральные взаимодействия.<br>Геохимическое минералообразование.<br>Переход вещества из биогенного круговорота в геологический.<br>Растворение и вынос органических, органоминеральных и минеральных веществ.<br>Прирост торфяной залежи. |
|                          | Восстановительный этап                     | Зона консервации, анаэробные условия   | Вялотекущие, преимущественно очаговые микробиологические процессы вторичных превращений некоторых органических, минеральных и органоминеральных компонентов торфа.<br><br>Вторичное преобразование органических и органоминеральных веществ торфа.<br>Наращение зоны консервации торфа вверх.   |

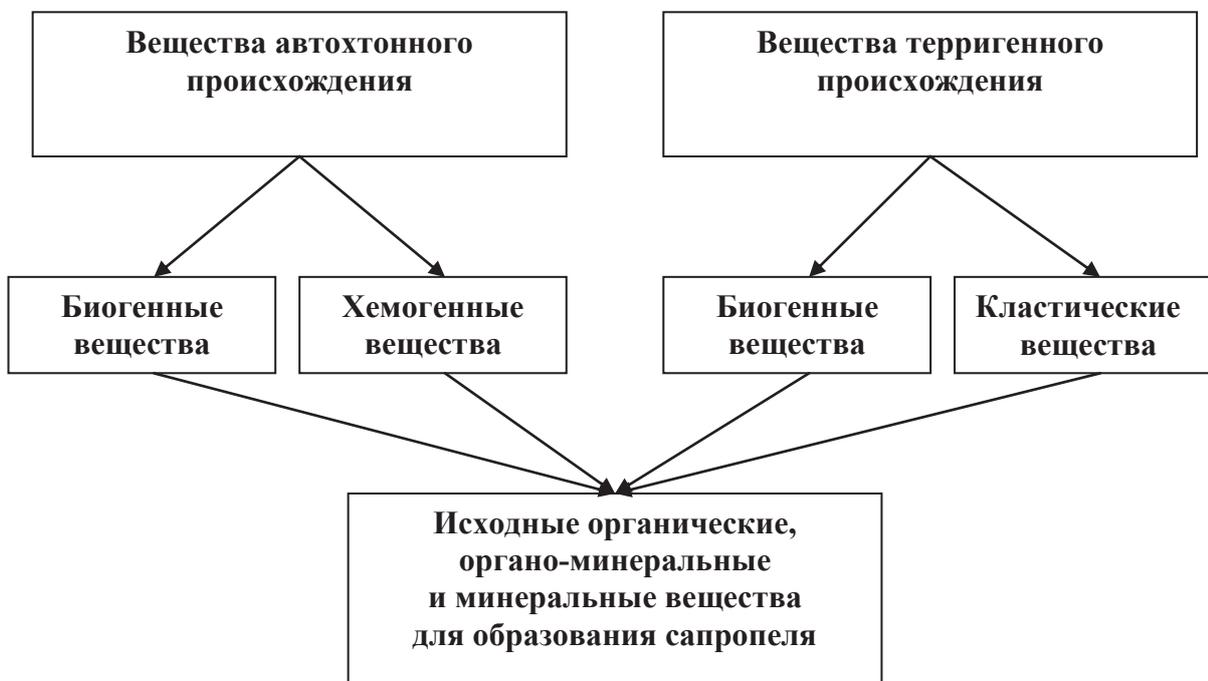
### Образование сапропеля

Образование сапропеля и сапропелевых месторождений – также длительный и сложный процесс. Источники и пути поступления веществ в озера и сапропелевые отложения показаны на рис. 1. Вещественный состав сапропеля формируется из трех основных источников: во-первых, это отмершие организмы озер – планктон, бентос и макрофиты; во-вторых, органические, минеральные и органоминеральные вещества, привносимые в озера с окружающих территорий ветром, атмосферными осадками, поверхностными и подземными водами; в-третьих, осадки, образующиеся в озерах из растворенных в

воде веществ в результате химических и физико-химических взаимодействий при периодических изменениях реакции среды, температуры, окислительно-восстановительного потенциала, насыщенности воды кислородом, углекислым и другими газами [10, 13, 33, 40]. Из трех вышеназванных источников поступления материалов для образования сапропеля формируются две большие группы веществ: первая – автохтонные вещества, которые продуцируются в самих водоемах, вторая – аллохтонные, или терригенные материалы, привнесенные в озера с окружающих территорий (рис. 2).



**Рис. 1.** Источники и пути поступления веществ в озера и сапропелевые отложения



**Рис. 2.** Схема формирования смеси исходных веществ для образования сапропеля

Органические, органоминеральные и минеральные вещества могут иметь как автохтонное, так и терригенное происхождение. Сапропелеобразователи биогенной природы могут формироваться как внутри водоемов, так и на окружающих территориях. В отличие от этого хемогенные вещества образуются только внутри водоемов в результате протекания химических реакций между растворенными в воде соединениями, а минеральные, например, глинистые частицы, привносятся в озера с окружающих территорий ветром или водными потоками.

Принципиально важен вопрос о количественном соотношении между веществами-сапропелеобразователями автохтонного и терригенного происхождения. По данным работ [6, 14, 16, 19, 22, 27, 32, 36, 38, 40] и других, поступление в озера терригенных материалов и распределение их по дну зависит от биоклиматических зон, где расположены озера, литологического состава пород на водосборах озер, рельефа местности, гидрологического режима озер, морфометрических особенностей озерных котловин, степени зарастания озер макрофитами, интенсивности продуцирования планктона, характера растительности береговой зоны и других физико-географических факторов. Из анализа публикаций этих авторов можно заключить, что доля терригенных минералов, поступающих в озера, оценивается величиной от 1 до 30% и весьма редко более чем в 30%, но чаще всего не выше 10% от общей массы веществ, поступившей в озеро в течение года. Наиболее богаты терригенными минералами проточные озера и озера с крутыми берегами. В зоне степных равнин терригенные материалы поступают в озера в основном эоловым путем.

Из обобщения работ [6, 10, 14, 16, 19, 22, 27, 32, 36, 38, 40] следует, что независимо от типа лимногенеза важнейшей особенностью сапропелевых отложений является их формирование из веществ преимущественно внутриводоемного генезиса.

На объемы и скорость поступления исходных материалов для образования сапропеля большое влияние оказывают биологическая продуктивность озер, зависящая от условий трофности, и интенсивность деструкции органического вещества, зависящая от кислородного режима, который в свою очередь зависит от глубины, проточности, размеров водоемов и других факторов. Биологическая продуктивность определяет общее количество биомассы и биогенных элементов, ежегодно участвующих в биогеохимических циклах образования сапропеля. Кислородный режим озер определяет интенсивность и глубину преобразования исходного органического вещества в сапропель: чем больше растворено кислорода в воде, тем интенсивнее протекают процессы минерализации и гумификации, тем глубже перерабатываются исходные материалы в сапропель. В белорусских озерах количество растворенного кислорода составляет от 16 до 0,2 мг/л, уменьшается с глубиной водного слоя и сильно изменяется по сезонам года [40]. Соответственно этому в разные сезоны года процессы поступления и преобразования исходных веществ для образования сапропеля происходят с разной интенсивностью.

Образование сапропеля начинается в водном слое озера со стадии седиментогенеза и завершается восстановительным этапом диагенеза в глубине сапропелевой залежи, причем переход окислительного эта-

па диагенеза в восстановительный осуществляется постепенно по мере расходования в осадках кислорода на дыхание аэробных организмов, преобразующих исходные вещества в сапропель, а также на химические процессы окисления, протекающие без участия организмов. Применительно к процессу образования сапропелевых отложений стадии и их этапы имеют особенности, суть которых изложена ниже и в обобщенном виде представлена в табл. 3.

Первая стадия образования сапропеля включает собственно седиментацию веществ и их первичное преобразование в процессе осаждения. Седиментация исходных веществ начинается с того момента, когда в воде озера появляются нерастворимые частицы органических, минеральных и органоминеральных веществ. Их оседание на дно озера осуществляется в соответствии с законами седиментации [24, 29] и по времени может длиться от секунд до месяцев. Например, коллоидные частицы оседают весьма медленно, причем внутриводоемные движения водных потоков препятствуют их седиментации. Ускорение седиментации таких частиц может происходить в результате их укрупнения. В противоположность этому, крупные обломочные материалы, поступающие в водный слой озера в результате абразии берегов, оседают в течение нескольких секунд.

Распределение оседающих частиц по дну озера зависит как от размеров частиц, так и от движений водного слоя в связи с течениями, волнениями и другими причинами, вызывающими перемещения водных масс. Как правило, вблизи берегов оседают крупнообломочные терригенные частицы, а в центральной части озера преобладают тонкодисперсные частицы. Таким образом, уже в процессе седиментации создаются предпосылки к формированию неоднородных по составу донных отложений в пределах озера.

При рассмотрении стадии седиментогенеза принципиальное значение имеют вопросы о вещественном составе исходных материалов для образования сапропеля, путях их поступления в озера, количестве веществ, поступающих на дно в течение годового биоцикла, о скорости и глубине изменения исходных материалов в процессе седиментации.

В процессе седиментогенеза происходят существенные химические и физические изменения первичных материалов за счет окисления, гидролиза, ферментативных процессов, ионного обмена, коагуляции, укрупнения частиц, сорбции и других процессов. Водная толща неоднородна, и, в зависимости от глубины, в ней выделяются аэробные и анаэробные слои. В водной толще происходят процессы как аэробного, так и анаэробного распада и синтеза органических веществ, процессы нитрификации, денитрификации, азотфиксации, преобразования соединений серы, фосфора и многие другие. Поэтому некоторые компоненты, например отмершие одноклеточные организмы, могут терять до 90% своей массы за время оседания [16, 17]. Доказано [17], что, чем больше слой воды, тем больше минерализуется исходных органических веществ в процессе седиментации. Наряду с этим в водоемах значительная часть органического и минерального вещества поступает на дно без существенных изменений в процессе седиментации. Это означает, что поступившая на дно озера смесь органических, минеральных и органоминеральных веществ еще не является сапропе-

лем. В сапропель эти вещества превратятся только в результате последующих глубоких преобразований.

Стадия седиментогенеза завершается, когда осевшие на дно озера частицы прочно закрепляются и не поднимаются с него при движениях воды. Итогом седиментогенеза является формирование на дне озера исходного материала для образования сапропеля в виде очень сложной смеси органических, минеральных и органоминеральных веществ разного генезиса, как показано на рис. 2.

В результате седиментации на дне озер постепенно формируются отложения, которые по вертикали делятся на два слоя: сверху – содержащий кислород и заселенный донными организмами, биологически деятельный, называемый пелогеном [28, 31], ниже залегает анаэробный, биологически инертный слой – зона консервации и медленных вторичных изменений.

Вторая стадия образования сапропеля – диагенез, начинается в пелогене, глубина которого в раз-

ных озерах колеблется в пределах 0,2–0,6 м [15, 21, 39]. Здесь достаточно кислорода, растворенного в воде, для жизнедеятельности бентоса и многих видов аэробных микроорганизмов, поэтому в результате биологических, биохимических, физических, химических, физико-химических, геохимических и геологических процессов происходит интенсивное преобразование исходных материалов в сапропель [17, 21, 28, 31, 39, 35]. Для пелогена характерны ферментативные и другие процессы биогенной минерализации и гумификации органического вещества, а также процессы гидролиза, окисления, восстановления, реакции замещения и ионного обмена, конденсации, деполимеризации, гидратации, дегидратации, процессы сорбции, десорбции и многие другие. При этом в пелогене ведущими и преобладающими являются процессы преобразования исходных материалов в сапропель, протекающие с участием аэробных живых организмов.

Табл. 3

**Биотические и абиотические процессы на разных стадиях образования сапропеля (ОВ = органическое вещество)**

| Стадия образования сапропеля | Место и условия               | Биотические процессы  | Абиотические процессы   |
|------------------------------|-------------------------------|---|---|
| Стадия седиментогенеза       | Водный слой, аэробные условия | Интенсивная жизнедеятельность водных организмов.<br>Фотосинтез и продуцирование биомассы.<br>Поглощение организмами веществ из воды.<br>Биогенное образование минералов.<br>Отмирание живых организмов.<br>Окисление и минерализация отмершего ОВ.<br>Биогенное изменение отмершего ОВ.   | Привнос вещества водными потоками.<br>Привнос вещества ветром.<br>Абразия берегов.<br>Хемогенное образование минералов.<br>Седиментация.<br>Перераспределение материалов по площади дна озера.<br>Сорбционные взаимодействия.   |
| Стадия диагенеза             | Окислительный этап            | Интенсивная жизнедеятельность бентосных организмов.<br>Биологическая и биохимическая деструкция ОВ.<br>Минерализация ОВ.<br>Гумификация ОВ.<br>Биохимическое окисление ОВ.<br>Ферментативная деполимеризация ОВ.<br>Ферментативная конденсация ОВ.<br>Завершение биогенного образования минералов.<br>Органоминеральные взаимодействия. | Дезагрегирование крупных обломочных материалов.<br>Агрегирование мелких частиц.<br>Сорбционные взаимодействия.<br>Ионный обмен.<br>Геохимическое минералообразование.<br>Переход вещества из биогенного круговорота в геологический.<br>Прирост сапропелевой залежи.  |
|                              | Восстановительный этап        | Зона консервации, анаэробные условия  | Вялотекущие, преимущественно очаговые микробиологические процессы вторичных превращений некоторых органических, минеральных и органоминеральных компонентов сапропеля.<br>Вторичное преобразование минералов и ОВ.<br>Старение коллоидной части сапропеля.<br>Обезвоживание сапропеля.<br>Уплотнение сапропеля.<br>Нарастание зоны консервации вверх. |

Принципиально важно, что в пелогене происходит синтез новых веществ, которых не было в исходных органических и минеральных материалах. К ним относятся гуминовые вещества, кальцит, сидерит, гипс, керченит, пирит и многие другие, а также гуматы и фульваты кальция, марганца, железа, глино-гумусовые и другие органоминеральные вещества. В пелогене окончательно освобождаются от остатков растительных и животных организмов такие биогенные минералы, как опал, арагонит, кальцит, лимонит.

Именно в пелогене происходят глубокие изменения первичных материалов, поступивших в озеро, в результате которых образуется сапропель. В пелогене сапропель формируется как таковой и приобретает свои характерные свойства: структуру, цвет, желеобразную консистенцию, вязкопластические свойства, биологический и химический составы и т. д.

Скорость и глубина преобразования исходных материалов в сапропель существенно зависят от количества растворенного кислорода в иловой воде, но его содержание постепенно и неуклонно уменьшается с глубиной в связи с расходом на дыхательные процессы бентосных организмов и на окисление находящихся здесь веществ. Вследствие этого с глубиной в пелогене постепенно уменьшается соотношение между окислительными и восстановительными процессами, поэтому окислительный этап диагенеза постепенно затухает и плавно переходит в восстановительный, или анаэробный этап, когда образовавшийся в пелогене сапропель в результате многолетних наслоений оказывается в зоне полного анаэробнозиса.

С этого момента начинается восстановительный этап медленных вторичных изменений сапропеля в условиях анаэробнозиса, который продолжается неопределенно долгое время, пока сапропелевая залежь находится в естественных условиях. В зоне полного анаэробнозиса на сапропель воздействуют лишь анаэробные микроорганизмы, физико-химические и геологические факторы, например давление, старение коллоидов, вторичные преобразования органического вещества, минералов и т. п. Здесь абиотические процессы преобладают над биотическими, при этом анаэробные микробиологические процессы имеют, как правило, не сплошной, а очаговый характер и протекают значительно медленнее аэробных процессов.

Еще медленнее протекают геологические процессы, поэтому сапропель здесь сохраняет в основном те свойства, которые он приобрел в пелогене, и изменяется столь медленными темпами, что условно всю часть сапропелевой залежи, расположенную ниже пелогена, называют зоной консервации и медленных вторичных изменений.

Вышеописанные этапы диагенеза сапропеля четко различаются между собой, однако естественно возникает вопрос, где в сапропелевой залежи проходит граница между пелогеном и зоной консервации? Теоретически такой границей могла бы быть линия, ниже которой растворенный в воде кислород отсутствует, а окислительно-восстановительный потенциал переходит от положительных значений к отрицательным. Ниже этой линии начинается зона абсолютного анаэробнозиса, которая распространяется вниз до границы между сапропелем и минеральным ложем озера. Интенсивные преобразования исходных веществ в сапропель протекают выше этой линии, а ниже нее сапропель консервируется с весьма

медленными изменениями состава и свойств, приобретенных в пелогене. Однако в действительности некоторые анаэробные процессы происходят и при положительных значениях окислительно-восстановительного потенциала, то есть выше этой линии, поэтому вопрос о точной границе между пелогеном и зоной консервации остается не решенным.

В зависимости от морфологических особенностей озерных котловин, глубины и качества воды в них, проточности, состава пород, в которых сформировались котловины, и ряда других причин глубина прохождения границы между пелогеном и зоной консервации может отличаться не только в разных озерах, но и на разных участках сапропелевой залежи в пределах одного озера. Вместе с тем, глубина пелогена 0,2–0,6 м, определенная эмпирическим путем [17, 21–39], вполне соответствует современным представлениям о процессах сапропелеобразования и может быть принята в практических оценках сапропелевых отложений.

Формирование сапропелевых залежей во многом обусловлено высокой динамичностью процессов, протекающих в пелогене. Ежегодно на его поверхность систематически поступают новые порции материалов, из которых затем формируется сапропель. Переработка поступивших материалов живыми организмами требует определенного расхода растворенного в воде кислорода, поэтому нижняя часть пелогена испытывает его дефицит и ежегодно переходит из зоны аэрации в зону анаэробнозиса по глубине на такую же примерно величину, на какую увеличился верхний слой пелогена. Таким образом, сформировавшийся в пелогене сапропель, перекрываясь новыми ежегодными отложениями, постепенно переходит из биологически деятельного в биологически инертный слой сапропелевой залежи, то есть зона анаэробных процессов и консервации нарастает в сапропелевых залежах снизу вверх. В пелогене устанавливается динамическое равновесие между ежегодным поступлением нового вещества и переходом в зону консервации образовавшегося сапропеля.

Вследствие этих процессов толща пелогена в течение сотен и тысяч лет остается более или менее постоянной и не выходит за пределы 0,6 м, в то время как слой сапропеля в зоне консервации в результате описанных выше процессов систематически нарастает и может достигать 10–20 м и более. Скорость нарастания сапропелевых залежей колеблется в широких пределах от 0,1 до 2,5 мм в год [20].

В табл. 3 представлен перечень наиболее характерных биотических и абиотических процессов, протекающих на разных стадиях и этапах формирования сапропелевых отложений. Как видно, обе группы процессов имеют место на всех вышеописанных стадиях и этапах, однако соотношения между биотическими и абиотическими процессами для разных стадий и этапов различны. В зеленых растениях озер идет процесс фотосинтеза, который создает благоприятные предпосылки для внутриводоемного образования органического вещества водорослей и поступления его на дно: чем интенсивнее протекает фотосинтез, тем больше органического вещества поступает для образования сапропеля.

Для стадии седиментогенеза типичны физические и геологические процессы привноса и перераспределения по дну озер исходных материалов для об-

разования сапропеля, в то время как биотические процессы преобразования исходных материалов в сапропель на этой стадии имеют ограниченное распространение из-за кратковременности оседания отмершего органического вещества на дно водоемов. Для этой стадии характерны процессы лишь первичных преобразований органических и минеральных веществ, которые, однако, не завершаются в зоне седиментации образованием сапропеля.

Для окислительного этапа диагенеза, проходящего в пелогене, преобладающими являются аэробные биотические процессы, в результате которых в сочетании с менее выраженными анаэробными и абиотическими процессами образуется сапропель как особая органоминеральная горная порода, которая затем поступает в зону консервации и медленных вторичных изменений.

Пелоген – это зона в сапропелевой залежи с преобладанием биотических процессов над геологическими и другими абиотическими. В противоположность этому, для восстановительного этапа диагенеза, проходящего в зоне консервации сапропелевых отложений, наиболее типичны геологические и другие абиотические процессы в сочетании с очаговыми анаэробными вялотекущими биотическими. В совокупности они обеспечивают некоторые медленные и малозаметные вторичные преобразования сапропеля, сформировавшегося в пелогене.

### Сопоставление процессов образования торфа и сапропеля

На основании сопоставления ведущих процессов, происходящих в торфяных и сапропелевых залежах, вполне уместно провести аналогию между пелогеном и торфогенным слоем, а также между зонами консервации в торфяных и сапропелевых залежах. Динамика процессов в этих слоях и механизмы нарастания зон консервации и вторичных изменений органогенных отложений в торфяных и сапропелевых залежах весьма сходны, отличаясь только исходными материалами и условиями их преобразования, влияющими на качество аккумулируемых продуктов – торфа и сапропеля.

Действительно, при сопоставлении сапропелевых и торфяных залежей (табл. 4) отчетливо проявляются общие принципы их образования и развития. Стадия седиментогенеза в озерах соответствует стадия надземного преобразования отмерших растений-торфообразователей. Торф формируется в верхнем, торфогенном слое торфяной залежи с преобладанием аэробных условий, а сапропель – в верхнем слое сапропелевой залежи – пелогене, где также преобладают аэробные условия. В торфяных залежах ниже торфогенного слоя находится зона консервации и медленных вторичных изменений торфа в анаэробных условиях. Точно так же в сапропелевых залежах ниже пелогена находится зона консервации и медленных вторичных изменений сапропеля в анаэробных условиях.

Наличие этих принципиально различных зон в торфяных и сапропелевых залежах с границами раздела между ними по линии начала полного анаэробнозона в совокупности с незамкнутостью годового биотического цикла углерода и азота обеспечивает переход веществ из биогенного круговорота в геологический на неопределенно долгое время. В биогенном круговороте торф и сапропель находятся не более нескольких сотен лет,

в то время как в геологическом – тысячи, десятки и сотни тысяч лет (последнее относится к межледниковым отложениям). Как отмечалось ранее [3], свойствами переходного звена между биогенным и геологическим круговоротами углерода обладают только торфяные и сапропелевые месторождения, в то время как в других угодьях: лесах, лугах, степях, агроландшафтах – переход органического вещества из биогенного круговорота в геологический не происходит.

В связи с этим необходимо подчеркнуть, что мелкодисперсные осадки, накапливающиеся на дне искусственных водоемов и каналов, не являются сапропелем, так как их возраст исчисляется лишь десятками лет, а настоящие сапропелевые отложения формируются в течение сотен и тысяч лет, причем основными веществами, образующими осадки в каналах и искусственных водоемах, являются материалы, привносимые с окружающих территорий, в то время как в образовании сапропеля основную роль играют вещества внутриводоемного генезиса.

Отмеченное выше сходство процессов образования торфяных и сапропелевых месторождений позволяет поставить на обсуждение вопрос о целесообразности использования сходной терминологии для описания соответствующих отложений. Термин «пелоген», предложенный М.М. Соловьевым [28], в целом удачно отражает характер процессов, протекающих в верхней части сапропелевой залежи, однако применительно к характеристике конкретного слоя отложений в земной коре этот термин звучит не по-русски. В русском языке геологические термины с окончанием «-ен» в большей степени соответствуют обозначениям временных периодов развития земной коры и биосферы, например «голоцен», «плейстоцен», «антропоген», «неоген», «палеоген» и т. п. Для обозначения материальных отложений в земной коре, включая полезные ископаемые, в русском языке используются существительные «слой» или «пласт» с соответствующим прилагательным, характеризующим состав отложений. С учетом этого для обозначения верхней биологически деятельной части сапропелевой залежи вместо термина «пелоген» было бы целесообразно использовать термин «пелогенный слой» по аналогии с общепринятым термином «торфогенный слой», что будет соответствовать не только установившимся традициям использования русскоязычных терминов в биогеохимии и геологии, но и их физическому смыслу. Авторский приоритет М.М. Соловьева при этом полностью сохраняется.

### Заключение

Торфяные и сапропелевые отложения формируются, как и все осадочные породы, в две стадии: седиментогенез и диагенез. Стадия седиментогенеза на болотах проходит в надземном слое и заканчивается отложением исходных материалов на поверхности почвы, в озерах стадия седиментогенеза протекает в водном слое и заканчивается после закрепления осевших материалов на дне. Стадия диагенеза проходит в два этапа: окислительный и восстановительный. Окислительному этапу соответствует в торфяных отложениях зона торфогенного слоя, в сапропелевых отложениях – зона пелогена. На указанных стадиях и этапах торфяные и сапропелевые отложения формируются в результате сочетания биотических и абиотических процессов.

Сравнительная характеристика торфяных и сапропелевых залежей

| Показатели, характеризующие слой                        | Торфяная залежь             |                              | Сапропелевая залежь         |                                  |
|---|-----------------------------|------------------------------|-----------------------------|----------------------------------|
|   | Торфогенный слой            | Зона консервации             | Пелоген                     | Зона консервации                 |
| Глубина распространения слоя, м                         | До 0,6                      | До 30                        | До 0,6                      | До 30                            |
| Наиболее часто встречающаяся глубина слоя, м            | 0,2–0,3                     | 1–10                         | 0,2–0,3                     | 1–10                             |
| Преобладающий тип круговорота вещества и потока энергии | Биогенный                   | Геологический                | Биогенный                   | Геологический                    |
| Место поступления твердого вещества                     | На поверхность              | Не поступает                 | На поверхность              | Не поступает                     |
| Место поступления растворенного вещества                | По всему слою               | По всему слою                | По всему слою               | По всему слою                    |
| Этап диагенеза  | Окислительный               | Восстановительный            | Окислительный               | Восстановительный                |
| Преобладающие процессы в слое                           | Аэробные биотические        | Геологические                | Аэробные биотические        | Геологические                    |
| Подчиненные процессы в слое                             | Геологические               | Анаэробные биотические       | Геологические               | Анаэробные биотические           |
| Скорость нарастания слоя, мм/год                        | 0 (динамическое равновесие) | 0,1–2,1                      | 0 (динамическое равновесие) | 0,1–2,5                          |
| Продолжительность этапа диагенеза, годы                 | 100–500                     | Неопределенно долгое время   | 100–500                     | Неопределенно долгое время       |
| Основной итог пребывания вещества в слое                | Формирование торфа          | Формирование торфяной залежи | Формирование сапропеля      | Формирование сапропелевой залежи |

Общими биотическими процессами формирования торфяных и сапропелевых отложений являются: фотосинтез и продуцирование биомассы, биохимическое окисление, гумификация, завершающаяся биогеохимическим синтезом гуминовых веществ, отсутствующих в исходных материалах, и минерализация органического вещества до конечных продуктов (воды, диоксида углерода, аммиака и др.). Общими абиотическими процессами являются: поступление исходных веществ с окружающих территорий с водными потоками и ветром, с атмосферными осадками, деструкция и измельчение исходных материалов, органо-минеральные взаимодействия, геохимическое минералообразование, уплотнение отложений.

На стадии седиментогенеза наиболее характерными абиотическими процессами формирования исходных материалов для образования сапропеля являются: абразия берегов и привнесение минеральных веществ с окружающих суходолов и перераспределение по дну озера в соответствии с законами седиментации. Если озеро окружено болотом, в него привносится главным образом органическое вещество. Доля терригенных материалов в озерных отложениях может достигать 30%. Кроме этого в озерах значительная часть исходных минералов формируется хемогенным и биогенным путем. В совокупности

это обеспечивает высокое содержание минеральных компонентов в сапропелевых отложениях (15–85%), при этом в отдельных случаях вклад абиотических процессов в формирование сапропеля может быть основным, например при формировании сапропеля, обогащенного глинистыми минералами.

В отличие от этого, не менее 95% всех исходных материалов для образования торфа формируется непосредственно на болотах, привнесение веществ с окружающих суходолов ограничено лишь краевыми зонами низинных болот (несколько метров), а в болота верхового и переходного типов терригенные материалы с суходолов вообще не поступают. Исключения составляют пойменные болота, где привносимые паводковыми водами терригенные материалы в прирусловых частях пойм могут оказывать заметное влияние на состав образующегося торфа, но даже в таких местах содержание минеральных компонентов в торфе, как правило, не превышает 30%.

На окислительном этапе диагенеза в торфогенном слое и пелогене происходят наиболее интенсивные преобразования исходных компонентов, и именно на этом этапе торф и сапропель формируются как таковые и приобретают все основные свойства, которые, однако, зависят от соотношения биогенных и абиогенных процессов: преобладание биогенных процессов обуславливает формирование малозоль-

ных отложений, а абиогенных – высокозольных. На восстановительном этапе диагенеза торф и сапропель подвергаются весьма медленным вторичным изменениям под влиянием анаэробных биогенных и абиогенных процессов.

Принципиальное значение имеет соотношение между аэробными и анаэробными процессами на всех стадиях и этапах формирования торфяных и сапропелевых отложений, обуславливающее незамкнутость годовых биоциклов углерода, азота и других биогенных элементов, а также переход их из

биогенного круговорота в геологический. Наилучшие условия для такого перехода создаются только на болотах и в тех озерах, где имеет место образование и аккумуляция сапропеля, в то время как в лесах, степях, агроценозах и других экосистемах переход элементов из биогенного круговорота в геологический ничтожно мал или вообще не имеет места. Тем самым, торфяные и сапропелевые залежи в ненарушенном состоянии выполняют в биосфере уникальную роль передаточного звена между биогенным и геологическим круговоротами.

## Литература

1. Аристовская Т.В. Микробиология процессов почвообразования. – Л. : Наука, 1980.
2. Бамбалов Н.Н. Баланс органического вещества торфяных почв и методы его изучения. – Мн. : Наука и техника, 1984.
3. Бамбалов Н. Н., Ракович В.А. Роль болот в биосфере. – Мн. : Белорусская наука, 2005.
4. Бартош Т.Д. О распространении залежей голоценовых пресноводных известковых отложений в нечерноземной полосе Европейской части СССР // Материалы по изучению пресноводных известковых отложений. 4.2. – Рига : Изд-во АН Латвийской ССР, 1963. – С. 11–26.
5. Бульон В.В. Первичная продукция планктона внутренних водоемов. – Л. : Наука, 1983.
6. Винберг Г.Г. Первичная продукция водоемов. – Мн. : Изд-во АН БССР, 1960.
7. Герасимов Д.А. Торф, его происхождение, залегание и распространение. – М.; Л. : ОНТИ, 1982.
8. Диагенез // БСЭ. – Т. 8. – М. : Изд-во Сов. энциклопедия, 1976. – С. 222–223.
9. Диагенез // Горная энциклопедия. – Т. 2. – М. : Изд-во Сов. энциклопедия, 1986. – С. 222.
10. Жуховицкая А.Л., Власов Б.П., Курзо Б.В., Кузнецов В.А. Озерный седиментогенез в голоцене Беларуси. – Мн., 1998.
11. Козловская Л.С. Роль беспозвоночных в трансформации органического вещества болотных почв. – Л. : Наука, 1976.
12. Козловская Л.С., Медведева В.М., Пьявченко Н.И. Динамика органического вещества в процессе торфообразования. – Л. : Наука, 1978.
13. Кордэ Н.В. Биостратификация и типология русских сапропелей. – М. : Изд-во АН СССР, 1960.
14. Кротов Б.П. Типы пресных озер и образующиеся в них руды // ДАН СССР. – Т. 71. – № 5. – 1950. – С. 26–33.
15. Кузнецов С.И. Роль микроорганизмов в образовании сапропелевых отложений // Химия и генезис твердых горючих ископаемых. – М. : Изд-во АН СССР, 1953. – С. 386–397.
16. Кузнецов С.И. Микрофлора озер и ее геохимическая деятельность. – Л. : Наука, 1970.
17. Кузнецов С.И., Саралов А.И., Назина Т.Н. Микробиологические процессы круговорота углерода и азота в озерах. – М. : Наука, 1985.
18. Курбатов И.М. Состав торфогенного слоя // Тр. НИИ торфа. – Вып. 14. – М., 1934. – С. 79–120.
19. Курзо Б.В. Закономерности формирования и проблемы использования сапропеля. – Мн. : Белорусская наука, 2005.
20. Курзо Б.В., Богданов С.В. Генезис и ресурсы сапропелей Белоруссии. – Мн. : Наука и техника, 1989.
21. Омелянский В.Л. Заметка о сапропеле // Изв. Комиссии по изучению естественно-производительных сил Союза при АН СССР. – Вып. 2. – Л. : Изд-во АН СССР, 1925. – С. 11–15.
22. Осадочные горные породы // БСЭ. – Т. 18. – М. : Изд-во Сов. энциклопедия, 1976. – С. 576.
23. Осадочные горные породы // Горная энциклопедия. – Т. 4. – М. : Изд-во Сов. энциклопедия, 1986. – С. 7.
24. Пидопличко А.П. Озерные отложения Белорусской ССР. – Мн. : Наука и техника, 1975.
25. Перфильев Б.В. Микрозональное строение иловых озерных отложений и методы его исследования. – Л. : Наука, 1972.
26. Пьявченко Н.И. Торфонакопление и его продуктивность // Динамика органического вещества в процессе торфообразования. – Л. : Наука, 1978. – С. 141–155.
27. Россолимо Л.Л. Основы типизации озер и лимнологического районирования // Накопление вещества в озерах. – М., 1964. – С. 5–46.
28. Рылов В.М. По вопросу о принятии особого термина для верхнего образующего слоя сапропеля // Известия сапропелевого комитета. – Вып. 3. – Л., 1926. – С. 190–191.
29. Седиментогенез // БСЭ. – Т. 23. – Изд-во Сов. энциклопедия, 1976. – С. 167.
30. Скрынникова И.Н. Классификация целинных болотных и мелиорированных торфяных почв СССР // Почвоведение. – 1964. – № 5. – С. 14–26.
31. Соловьев М.М. Проблемы сапропеля в СССР. – Л. : Изд-во АН СССР, 1932.

32. *Стеклов Н.А., Ильина Е.Д.* О генетической классификации отложений сапропеля // Проблемы использования сапропелей в народном хозяйстве. – Мн. : Наука и техника, 1976. – С. 63–73.

33. *Страхов Н.М. Бродская Н.Г., Князева Л.М.* Общая схема осадкообразования в современных морях и озерах малой минерализации. // Образование осадков в современных водоемах. – М.: Изд-во АН СССР, 1954.

34. *Страхов Н.М.* Основы теории литогенеза. – Т. 1. – М. : Изд-во АН СССР, 1960.

35. *Страхов Н.М.* Основы теории литогенеза. – Т. 2. – М. : Изд-во АН СССР, 1962.

36. *Тарантов А.С.* Минералогия и геохимия сапропелевых месторождений. – Калинин, 1990.

37. *Тюремнов С.Н.* Торфяные месторождения. – М. : Недра, 1976.

38. *Успенская О.Н.* Изучение истории озер методом комплексного биологического анализа. Автореф. дисс. ... канд. биол. наук. – М., 1979.

39. *Экзерцев В.А.* Определение мощности микробиологически активного слоя отложений некоторых озер // Микробиология. – 1948. – Т. 17. – № 6. – С. 476–483.

40. *Якушко О.Ф.* Озероведение: география озер Белоруссии. – Мн. : Высшая школа, 1971.

