НАУЧНО-ПРАКТИЧЕСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ

«ШАГИ В НАУКУ ХХI ВЕКА»

**ПРОБЛЕМА БИООБРАСТАНИЯ ГРАНИТА В УСЛОВИЯХ ГОРОДСКОЙ СРЕДЫ**

*Исполнитель:*

Никул Ксения, 10 класс

ГБОУ «Академическая гимназия № 56»

*Руководители:*

Иудина Татьяна Анатольевна, к.б.н., методист

ГБУ ДОД ДД(ю)Т Московского района

Чальцева Елена Николаевна, учитель биологии

ГБОУ«Академическая гимназия № 56»

Санкт-Петербург

2021

ОГЛАВЛЕНИЕ

**Введение**………………………………………………………………………………………3

**Глава 1.** ЛИТЕРАТУРНЫЙ ОБЗОР………………………………………………………...4

1.1. Основные типы выветривания гранита………………………………………..4

1.2. Характеристика основных групп микроорганизмов –

деструкторов гранита……………………………………………………………6

1.3. Образование биопленок…………………………………………………………8

1.4. Лишайники – группа живых организмов, способных оказывать

химическое и физическое воздействие на гранит…………………………...10

1.5. Мхи и семенные растения, колонизирующие камень в городской среде…...11

**Глава 2.** ОБЪЕТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ……………………………………..12

2.1. Объекты исследования………………..………………………………………..12

2.2. Методы исследования…………………………………………………………..12

2.3. Методы выделения микроорганизмов из образцов поврежденного

гранита…………………………………………………………………………..15

**Глава 3.** РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ……………………………………………..16

**Выводы**……………………………………………………………………………………...19

**Список литературы**………………………………………………………………………..20

**Приложение 1**……………………………………………………………………………….21

**Приложение 2**……………………………………………………………………………….21

**Приложение 3**……………………………………………………………………………….23

**Приложение 4**……………………………………………………………………………….23

ВВЕДЕНИЕ

Санкт-Петербург воспринимается многими как гранитный город. Не удивительно, что гранит является его историческим символом. Из этого камня сделаны архитектурные ансамбли и монументы Санкт-Петербурга, создающие неповторимы облик его центральной части. Гранитом облицована Петропавловская крепость, и основания многих дворцов и домов. Огромные монолиты гранитов использованы в качестве пьедесталов памятников; Александровская колонна украшает Петербург, прекрасны колоннады Исаакиевского собора и колоннады в интерьере Казанского собора.

Проблема разрушения камня в городской среде вызывает большой интерес в связи с необходимостью повышения долговечности зданий и сооружений, а также сохранение объектов культурного наследия. Гранит относится к прочным типам камня, но и он подвергается процессам физического, химического и биогенного выветривания. В городской среде эти процессы могут ускорятся в связи с воздействием антропогенного фактора.

Анализ механизмов разрушения природного камня требует комплексного подхода, предполагающего использование широкого арсенала современных аналитических методов, и применение профессиональных усилий специалистов различных направлений: геологии, минералогии, биологии, физики, химии. Знание факторов и понимание механизмов разрушения гранита позволяет создать методическую основу для правильного выбора камня при строительстве современных и реставрации исторических объектов, а также разработать методы очистки и консервации каменного материала в условиях нарастающего техногенеза.

Настоящая работа посвящена основным факторам выветривания гранита в условиях городской среды. Особое внимание мы уделили биологическому фактору, наименее изученному с точки зрения воздействия на природный камень.

Цель работы: изучение проблемы биообрастания гранита в условиях городской среды.

В задачу исследования входило:

1. Познакомиться с основными факторами и механизмами разрушения гранита в условиях нарастающего техногенеза.

2. Выявить и охарактеризовать основные биодеструкторы гранита, приводящие к процессам биоразрушения.

3. Идентифицировать состав микро и макрообрастателей на каменистых субстратах.

3

4. Установить доминирующие виды обрастателей, составляющих литобионтные сообщества.

Объект исследования: в качестве объектов исследования были выбраны граниты в постройках разного возраста от 16 века до современных.

Предмет исследования: процессы биологического разрушения камня

Гипотеза: мы предположили, что если установить основные биодеструкторы гранита, то можно разработать более эффективные методы защиты исторических памятников Санкт-Петербурга.

ГЛАВА 1. ЛИТЕРАТРНЫЙ ОБЗОР

**1.1. Основные типы выветривания гранита**

Учитывая сложность и многофакторность выветривания гранита, рассмотрим основные типы данного процесса.

Выветривание горных пород – это процесс разрушения и изменения минералов пород под воздействием физических, химических и биологических факторов. Выветривание подразделяется на: физическое (или механическое), химическое и биогенное.

Физическое выветривание – это дезинтергация породы без существенного изменения состава обломков. Физическое выветривание происходит, в основном под действием изменения температуры, замерзания – оттаивания, кристаллизации содержащихся в капиллярной воде солей, а также ветра. Особое место занимает ударное действие ветра, роль которого возрастает в крупных мегаполисах из-за большого количества пыли, оказывающей абразивное воздействие на породу. Загрязненная атмосфера – один из самых мощных, постоянно действующих факторов воздействия на камень в архитектуре больших городов.

Пыль – это мельчайшие твердые взвешенные частицы, которые могут иметь как природное, так и техногенное происхождение, механические и химические свойства которой зависят от ее природы. Источником частиц природного происхождения являются продукты выветривания почвы, а также облицовочного камня архитектурных построек. Техногенные частицы поступают в атмосферу в виде выбросов предприятий, а также транспорта.

Химическое выветривание - представляет собой процесс химического преобразования минералов и горных пород под действием воды, кислорода, двуокиси углерода, органических кислот, а также вследствие биохимических процессов.

4

Ведущие процессы химического выветривания – растворение, выщелачивание, окисление. Гидратация, карбонатизация, гидролиз и пр. В процессе выветривания происходит вынос химических элементов, оксидов, гидроксидов в форме истинных и

коллоидных растворов, в виде взвесей глинистых частиц. Большое значение в процессах химического выветривания играет рН, а также окислительно-восстановительный потенциал Еh.

Биогенное выветривание или биологическая колонизация связано с воздействием на горные породы живых организмов. Под биообрастанием понимается развитие (аккумуляция) живых организмов (микроорганизмов, грибов, растений, животных) на твердом субстрате. Биообрастание может иметь различную продолжительность и сопровождаться постепенным разрушением (деструкцией) субстрата.

Биодеструкция особый вид разрушения пород и материалов, связанный с воздействием живых организмов или продуктов их жизнедеятельности. Это обусловлено совокупностью реакций изменения свойств или разрушения материала, вызванных чаще всего действием группы организмов. (РВСН 20-01-2006. Защита строительных конструкций. Зданий и сооружений от агрессивных химических и биологических воздействий окружающей среды. – СПб.: Правительство Санкт-Петербурга, 2006. – 50 с.)

Биодеструктором (агентом биоповреждения) называется организм, повреждающий материал. Развитие деструктивных процессов может приводить к потере основных свойств материала, его последовательному и полному разрушению. Процессы биодеструкции затрагивают практически все известные материалы.

Большинство работ, посвященных биодеструкцуии каменного материала в городской среде, было выполнено на примере карбонатных пород, а также искусственного строительного камня [6]. В отношении гранита эти исследования носят отрывочный характер. Между тем, причиной биологического разрушения гранита могут выступать различные группы живых организмов. К деструкторам этой породы относят бактерии, микроскопические водоросли, грибы, мхи, лишайники, высшие растения, беспозвоночные и позвоночные животные. Однако, по мнению большинства исследователей, основной ущерб гранитным сооружениям наносят микроорганизмы, обладающие очень высокой деструктивной активностью [6]. Механизмы их воздействия на гранит весьма разнообразны. В литературе в основном описываются гетеротрофные микроорганизмы в качестве основных деструкторов гранита [6].

5

Выделение органических кислот – один из важных факторов воздействия гетеротрофных микроорганизмов на минеральный субстрат[8].

Органические кислоты реагируют с силикатными минералами, выщелачивают металлы. Формируя комплексы оксалатов. Включая комплексы с алюминием и железом [7].

**1.2. Характеристика основных групп микроорганизмов – деструкторов гранита**

На основе литературных данных и собственных исследований мы приводим краткую характеристику микроорганизмов, способных поселяться на граните. Силикатные бактерии – слабо изученная группа бактерий. Из литературных источников известно, что эти микроорганизмы способны развиваться на силикатных породах, способствуя их разрушению. Они могут растворять силикаты и алюмосиликаты. Силикатные бактерии отмечали на кварце, полевом шпате, глинистых минералах. К данной группе чаще всего относят *Bacillus mucilaginosus*(слизистые бациллы)[5].

На гранитах часто встречаются и другие спорообразующие бактерии рода *Bacillus*. Бактерии этого рода способны выдерживать неблагоприятные условия на поверхности камня за счет образования спор. Экспериментально было доказано, что *Bacillus subtilis* в результате воздействия на гранит формирует каверны. Бактерии избирательно прикрепляются к минералам и «потребляют» важные для себя элементы из минерала. При этом плагиоклаз подвергается большему воздействию, чем биотит. В целом важно отметить, что многие микроорганизмы избирательно поселяются на минералах. Например, на кварце сообщества более простые в отличие от других минералов. Кварц имеет простую химическую формулу SiO₂ и ограничивает бактериальное питание в большей степени, чем другие минералы. Однако поверхностное загрязнение может изменять численность и разнообразие микроорганизмов на поверхности камня.

Актиномицеты – гетеротрофные бактерии, способные формировать на некоторых стадиях развития ветвящийся мицелий. Большинство актиномицетов – аэробы; факультативные анаэробы встречаются среди актиномицетов с непродолжительной мицелиальной стадией. Основной средой обитания для актиномицетов является почва. Актиномицеты повсеместно встречаются на поверхности облицовочных материалов зданий. В литературе говорится об актиномицетах, способствующих разрушению гранита. Доминирующими родами

актиномицетов, выделенных из поврежденного гранита, были Nocardia и Streptomyces

6

[8]. За счет формирования ветвящихся нитей актиномицеты закрепляются на субстрате и ускоряют выветривание камня механическим и химическим путем. При

этом отмечается способность этих микроорганизмов участвовать в процессах биоремедиации (биологической очистке) поверхности камня, загрязненной металлами. Некоторые актиномицеты способны осаждать такие металлы, как медь, железо, цинк, кадмий, серебро.

Фотоавтотрофные организмы, например, микроскопические зеленые водоросли и цианобактерии, часто рассматриваются в качестве пионеров заселения горных пород на открытом воздухе, поскольку они независимы от наличия органического вещества в субстрате [4]. Водоросли способны активно выделять во внешнюю среду различные продукты ассимиляции, включая аминокислоты, сахара, ростовые вещества, антибиотики. Эти вещества часто служат источником питания для хемоорганотрофных бактерий и грибов, а также могут оказывать заметное влияние на субстрат. Водоросли способны формировать биопленки (чаще зеленого цвета). Среди водорослей на поверхности гранита доминируют представители отдела *Chlorophyta* (Зеленые водоросли) [6].

Микроскопические грибы (микромицеты) – гетеротрофные организмы, которые используют различные органические вещества из субстрата или из внешней среды в качестве источников энергии для роста и развития. Источником питания для грибов могут служить метаболиты или остатки водорослей, лишайников, бактерий. Деструктивная активность микромицетов обусловлена химическим и механическим (физическим) воздействием на субстрат [8]. Основными повреждающими факторами в случае роста микромицетов на поверхности гранита является выделение в процессе жизнедеятельности агрессивных метаболитов (прежде всего, органических кислот и ферментов), а также способность к механическому проникновению в толщу субстрата по микротрещинам [4]. На горных породах наиболее часто встречаются почвенные грибы из родов *Penicillium, Aspergillus, Cladosporium и Fusarium*. По мнению ряда авторов, именно эти грибы являются наиболее вредоносной группой организмов, поселяющихся на фасадах зданий в городской среде [7]. Они способны утилизировать большой спектр питательных веществ. Даже следовые количества органики могут стимулировать их рост и использоваться в качестве источника энергии. Визуально воздействие грибов на породу может проявиться как в разрушении камня, так и в образовании черных пятен на поверхности субстрата. Грибные гифы обнаруживаются на глубине нескольких миллиметров от поверхности камня. Гифы

7

внутри трещин находятся в комплексе с биоминеральными образованиями оксалатов кальция и кальцита. Подобная биоминеральная прослойка создает внутреннее давление

и ведет к отслоению породы [4].

Перечисленные выше микроорганизмы формируют микробные сообщества, которые часто покрывают гранит как в естественных обнажениях, так и в городской среде. Микробное поражение каменистого материала углубляет и ускоряет процесс выветривания, что выражается в осыпании поверхностного слоя камня, формировании углублений (неоднородной поверхности) или поверхностных отложений (корок).

Условия окружающей среды чаще всего являются определяющими для освоения каменистого субстрата микроорганизмами [4]. Во многих случаях состав микробных сообществ определяется веществами, оседающими из атмосферы или попадающими на поверхность камня другими путями. Основными источниками поступления таких веществ могут выступать дождевая и грунтовая вода, почва и атмосфера, окружающая биота. Внешние условия определяют накопление на поверхности и в толще горных пород органических веществ различной химической природы: целлюлозы, пектина, крахмала, протеинов, спиртов, жиров, альдегидов и др. Все они могут быть утилизированы организмами гетеротрофного блока микробного сообщества, формирующегося на поверхности камня. В промышленно загрязненных зонах на поверхности гранита в результате гравитационных сил и выпадения осадков в повышенных количествах оседают соли тяжелых металлов, алифатические и ароматические углеводороды, соединения серы, фосфора, хлора, азота, углерода и других элементов. С одной стороны, оседающие вещества могут служить источниками питания для гетеротрофных организмов в городской среде. С другой стороны, токсические компоненты осадков способны ингибировать развитие поверхностной микробиоты [6].

**1.3. Образование биопленок**

Важно отметить, что микроорганизмы обычно присутствуют на поверхности камня в виде сложных биопленок. Биопленки – это сообщества микроорганизмов, прикрепленных к субстрату. Клетки микроорганизмов в биопленке погружены в органический матрикс микробного происхождения, который представлен полимерными веществами: полисахаридами, липополисахаридами, протеинами, гликопротеинами, липидами, гликолипидами, жирными кислотами и ферментами. Он выполняет интегрирующую функцию, а также способствует адгезии – прикреплению к

8

субстрату. Продукты жизнедеятельности микроорганизмов (слизи и другие внеклеточные полимерные вещества, мертвые остатки клеток и талломов) могут

склеиваться вместе с минеральными частицами. При этом формируется своеобразный «биоминеральный» поверхностный слой. Размеры и структура таких пленок во многом определяются свойствами субстрата, а также совокупностью внешних факторов [7].

Появлению биопленок на граните способствует аккумуляция загрязнений на поверхности субстрата. Развитие биопленки может приводить к изменению гидротермических характеристик материала [6]. Изменение пористости сопровождается нарушением циркуляции влаги в толще материала. Экзополимеры вызывают задержку воды в порах, увеличение давления. Биопленки уменьшают испарение с поверхности камня.

Образование биопленок начинается с изменения цвета поверхности субстрата, обусловленного накоплением органических пигментов (хлорофилла, меланинов, каротиноидов и других). Чаще всего речь идет о частично минерализованном хлорофилле цианобактериального происхождения или пигментах зеленых водорослей. Они дополняются окрашенными оксидами железа и марганца, формирующимися под действием грибов. Окрашенные первичные биопленки можно подразделить на: темноокрашенные, за счет присутствия меланинов, меланоидов, продуктов деградации хлорофилла, железистых и марганцевых материалов; зеленые и зеленоватые, за счет фотосинтетических пигментов водорослей и цианобактерий; желто-оранжево-коричневые (каротины, каротиноиды, продукты распада хлорофилла, такие как фикобилипротеины); ярко оранжевые, розовые и красноватые, обусловленные наличием пигментов хемоорганотрофных (галофильных) бактерий, а также продуктов деградации цианобактерий и водорослей, обогащенных железом [4]. Формирование первичных биопленок можно рассматривать как начальное биофизическое воздействие на поверхность гранита.

Изменчивость микробных биопленок на гранитной поверхности выше на зданиях в городской среде, чем на естественных обнажениях [3]. Это может быть связано с повышенной чувствительностью и адаптационной способностью организмов к изменчивым условиям городской среды. Микробные пленки сложного состава – один из основных типов биообрастаний в городской среде. Состав и структура биопленок могут быть использованы в целях биоиндикации состояния экосистем (практическое значение).

9

**1.4. Лишайники – группа живых организмов, способных оказывать химическое и физическое воздействие на гранит.**

Лишайники, представляющие собой симбиоз двух организмов – гриба и водоросли, прекрасно адаптированы к жизни на каменистых субстратах. Они активно развиваются на карбонатных и силикатных породах, бетоне, черепице и других материалах, способствуют аккумуляции влаги и органического вещества в поверхностном слое камня [6]. При первоначальном заселении каменистых субстратов лишайниками используют выветренные участки, границы зерен и мельчайшие трещинки в горной породе, в которые легче могут проникнуть грибные гифы. В результате проникновения гиф в камень поверхностная вода может достигнуть значительной глубины. Среди лишайников, развивающихся на каменистом субстрате, выделяются эпилиты (живут на поверхности субстрата) и эндолиты (внедряются в каменистый субстрат). Некоторые авторы считают, что основное воздействие лишайников на камень – физическое [6]. Однако следует отметить, что выветривание гранита под воздействием лишайника представляет собой комплексный физико-химический процесс. Лишайники выделяют органические кислоты с хелатирующей активностью, которые могут растворять минералы и образовывать комплексы с катионами металлов. Наиболее активной среди них является щавелевая кислота. Метаболиты лишайников вызывают изменения в поверхностном слое камня непосредственно под талломом лишайника. В результате высвобождаются основные химические элементы породы (Al, Mg, Mn, Zn, Si, Ca, K, Fe) и происходит аккумуляция некоторых из них в теле самого лишайника [7]. Высвобождение элементов породы зависит, прежде всего, от чувствительности минералов к выветриванию. В граните кальций и натрий из плагиоклаза легко высвобождается из минерала, а калий высвобождается в меньшей степени, поскольку встречается в более прочных минералах – калиевом полевом шпате и мусковите [4]. При отмирании лишайники оставляют признаки точечной коррозии из-за включения минеральных фрагментов в таллом.

Петрографические и электронно-микроскопическое исследование показывают, что гифы способны проникать в камень через структурные неоднородности (межкристаллическое пространство) камня, поры и по плоскостям спайности кристаллов. Глубина проникновения может превышать 4 мм. Проникновение гиф вызывает разрушение зерен и включение зерен в таллом. Слюда разрушается до мелких кристаллов, а кварц и полевые шпаты – до более крупных зерен [8]. На граните гифы эндолитных лишайников могут проникать внутрь камня в большей степени именно в

10

участках, занятых пластинками слюды, а дальше продвигаются уже благодаря химическому разрушению породы. Гифы довольно быстро разрушают слоистые кристаллы слюды. Здесь они разветвляются и отодвигают пластинки слюды одну от другой. Постепенно разрастаясь и разветвляясь, гифы образуют между пластинками грибную плектенхиму – ложную ткань грибов, образованную сплетением гиф. Затем в эту плектенхиму проникают клетки водорослей, которые размножаются, обвиваются гифами и все больше раздвигают отдельные листочки слюды. Таким образом, в граните слюда наиболее подвержена воздействию как физическому (проникновение гиф), так и химическому (воздействие органических кислот)[8].

Разрушая твердые горные породы, лишайники подготавливают поверхность камня для поселения других организмов: листоватых и кустистых лишайников, мхов, семенных растений, а также они могут принимать участие в образовании сложных биопленок.

**1.5. Мхи и семенные растения, колонизирующие камень в городской среде**

Высшие растения нередко развиваются на каменистых субстрата в условиях городской среды. Примером того могут служить заселенные мхами и травянистыми растениями цоколи исторических и современных зданий, скульптурные памятники. Известно, что поселение растений на каменистом субстрате приводит к его разрушению [4]. Причем от этого страдают памятники, как из карбонатных, так и силикатных пород. Структура гранита, наличие каверн и трещин часто служит дополнительным фактором биологической колонизации. Появление мхов, травянистых и даже древесных растений чаще всего наблюдается в местах заметной деструкции камня. В образующихся полостях и трещинах накапливается органическое вещество и постоянно присутствует влага, что создает благоприятные условия для развития растений. Кроме того, местом поселения споровых и семенных растений могут служить крупные пространства между отдельными блоками камня. Деструктивный эффект выражается как в непосредственном физическом воздействии растений на камень, так и в создании условий для развития агрессивного микробного сообщества.

В целом, все типы выветривания тесно взаимосвязаны и взаимообусловлены. Так, при физическом выветривании происходит механическое повреждение гранита, что создает благоприятные условия для химических и биологических процессов. В условиях городской среды деструкция камня усиливается под воздействием антропогенного фактора.

11

**ГЛАВА 2.** ОБЪЕКТЫ МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

**2.1. Объекты исследования**

В качестве объектов исследования были выбраны граниты в постройках разного возраста от 16 века до современных. Что позволяет проследить процессы разрушения камня за прошедший период времени. Объектами наблюдений явились гранитные набережные Петербурга, мостовые, здания, мосты и др. В период натурных наблюдений были обследованы граниты Карельского перешейка (г. Приозерск), г.Выборга (постройки 14 века), Санкт-Петербурга (Петропавловская крепость, набережные исторического центра, середина 18 века, и объекты облицованные в советский период). Обследованы набережные следующих водотоков центральной части Санкт-Петербурга: канала Грибоедова, рек Мойки, Фонтанки, Карповки, а также реки Невы (Адмиралтейская, Английская, Университетская набережные). В изучение были включены памятники музейных некрополей Александро-Невской лавры, а также фасады исторических зданий облицованных гранитом. В сравнительных целях были обследованы аналогичные объекты в г. Выборге, а также гранитные обнажения в местах добычи гранитного камня на Карельском перешейке.

В строительстве центра Санкт-Петербурга использованы граниты из разных месторождений. Все они имеют свои характерные, различимые невооруженным глазом особенности окраски, зернистости, рисунка, определяемые их минеральным составом и структурой. Самый известный из них – гранит рапакиви. В целом, гранит рапакиви – прочный камень, но в сравнении с другими типами гранитов процессы выветривания проявляются в большей степени, недаром в переводе с финского «рапакиви» значит «гнилой камень».

Исследования проводились нами в 2018-2020 гг., что позволило собрать необходимый материал для сравнительного исследования процессов деструкции различных типов гранитов.

**2.2. Методы исследования**

Главное внимание при выявлении повреждений гранита уделяли изменению цвета и структуры поверхностного слоя камня, различным формам обрастаний. При обнаружении повреждений субстрата. Фиксировали налеты и пятна различного цвета, отмечали наличие трещин, углублений, сколов и др.

При характеристике биообрастаний гранита учитывались цвет биопленок, обилие биопленок, их толщина, плотность. Приуроченность к трещинам или

12

выветренным фрагментам камня (избирательное биообрастание).

Отбор образцов производили с наиболее типичных участков поврежденного субстрата. Оценивалось биообрастание в зависимости от рельефа поверхности. Визуально (затем подтверждается в лабораторных условиях) определялся тип биопленки в зависимости от доминирующих видов: биопленки с доминирование водорослей, цианобактерий, микромицетов, одноклеточных животных и микроскопических многоклеточных организмов.

При оценке макрообрастаний гранита фиксировали присутствие лишайников, мхов и семенных растений. Обязательным элементом натурного обследования являлась фотосьемка. В ходе фотофиксации повреждений гранита биообрастателями нами было сделано более 500 фотографий.

Пробы условно делили на две группы: образцы самих разрушающихся материалов и пробы, отобранные неповреждающими методами с поверхности изучаемого объекта. В тех случаях, когда имеются значительные нарушения целостности поврежденной поверхности, происходит фрагментация, отслаивание и осыпание каменистого материала, отбор образцов производили в стерильные чашки Петри. Кроме того, были сделаны соскобы с колонизированных участков поверхности материала в стерильные емкости или непосредственно на питательную среду (агар) в чашки Петри. К неповреждающим методам отбора проб относится способ отпечатка с поверхности субстрата на питательную среду (метод бакпечаток), а также взятие мазка с поверхности памятника с помощью ватного тампона, который сразу помещали в стерильную чашку Петри с последующим переносом на питательную среду.

Отбор проб макрообрастаний (лишайников, мхов и сосудистых растений) проводили с соблюдением правил сбора гербарного материала. Гербарные сборы определяли на кафедре ботаники РГПУ им. А.И. Герцена.

Пробы первичной почвы отбирали из-под дерновин мхов, развивающихся в местах деструкции гранита. Они были использованы для проведения фаунистического исследования. Всего было отобрано более 500 проб. В процессе камеральной обработки проб был использован широкий спектр современных методов изучения. Для исследования образцов гранита с признаками биологических повреждений в лабораторных условиях использовали комплекс аналитических методов, позволяющих оценить характер повреждений поверхности камня, степень биологической колонизации породы, а также особенности взаимоотношений биодеструкторов с каменным материалом. При этом использовались методы, применяемые в минералогии,

13

микробиологии, микологии, альгологии, лихенологии.

При первичном изучении образцов поврежденного гранита, прежде всего, обращали внимание на структуру самого гранита, наличие микротрещин, углублений и других неровностей поверхности, которые могут служить убежищем для микроорганизмов и свидетельствовать о состоянии поверхностного слоя камня. Увеличения, получаемые при использовании обычной бинокулярной лупы, позволяют определять встречаемость биологических объектов (грибов, водорослей и лишайников), а также оценивать локализацию литобионтных организмов и степень дезинтеграции поверхностного слоя камня. Первичный просмотр поврежденного гранита дает возможность выбрать наиболее адекватный метод изоляции микроорганизмов из анализируемого образца. Например, когда микроскопические грибы (микромицеты) концентрируются в микротрещинах и их изоляция с поверхности камня существенно затруднена, предварительно активировали микромицеты, поместив образец или его фрагмент во влажную камеру в стерильных условиях на 1–2 недели. После формирования отчетливых гифальных структур (гриб «выходит» из микротрещин на поверхность породы) переносили их (под бинокуляром) стерильной микробиологической петлей на питательную среду. Этим же путем изолировали микроколониальные грибы. Метод сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) применялся в целях изучения особенностей распределения микроорганизмов в поверхностном слое камня, выявления основных зон локализации колоний и путей проникновения деструкторов в толщу субстрата. Этот метод позволяет выявить микроскопические объекты. Высокие увеличения и хорошее разрешение, достигаемые при использовании сканирующего электронного микроскопа, делают возможным изучение биологических объектов прямо на поверхности разрушающегося гранита. Образцы поврежденного камня, отбиравшиеся для СЭМ анализа, первоначально исследовали под бинокуляром и световым микроскопом марки МИКМЕД-1. Критерием отбора служило наличие структур микроорганизмов на поверхности камня, а также данные о возможной локализации микромицетов, актиномицетов, простейших в микрозонах (неоднородные участки, микротрещины, углубления) каменистого субстрата. Для СЭМ анализа проб предварительно применялись цитохимические методы, описанные в Большом практикуме по зоологии беспозвоночных (А.В. Иванов, Ю.И.Полянский и др., 1981). Материал просматривали в сканирующем электронном микроскопе в диапазоне увеличений от 100х до 10000х. Сканирующую электронную микроскопию (СЭМ) выполняли на базе Института цитологии РАН на приборе TescanMIRA 3 LMU. 14

**2.3. Методы выделения микроорганизмов из образцов поврежденного гранита**

Для выявления и идентификации микроорганизмов в биопленках на поверхности гранита использовали традиционные методы микологии, микробиологии и протистологии. При проведении бактериологического исследования выделение микроорганизмов осуществляли на агаризованные (твердые) питательные среды, описанные в практикуме по микробиологии [10].

Для выделения и идентификации одноклеточных и микроскопических беспозвоночных животных применяли классические методы описанные в Большом практикуме по зоологии беспозвоночных (А.В. Иванов, Ю.И.Полянский и др., 1981).

Кроме того, использовали жидкие питательные среды для выделения хемолитотрофных бактерий. Количественный учет микроорганизмов проводили с использованием метода разведений [10]. Для первичной изоляции, поддержания в культуре и идентификации микромицетов, раковинных амеб использовали агаризованный мясопептонный отвар. На отваре травы Тимофеевка культивировали растительных и животных жгутиконосцев. На сенном отваре, настое из банановых корок выращивали инфузорий. На родниковой воде, с добавлением зерен риса и сухого яичного желтка культивировали голых амеб.

Способы выделения грибов в культуру из образцов поврежденного гранита: – рассев крошек и мелких фрагментов субстрата на поверхность питательной среды; – метод смыва с поверхности субстрата, последующего разведения полученной суспензии и посева на питательную среду; – метод селективной изоляции грибов с поверхности субстрата на питательную среду с помощью бактериальной петли.

Сочетание различных приемов изоляции микромицетов и использование набора питательных сред, перечисленных выше, позволяет максимально полно и объективно оценить видовое разнообразие микромицетов на каменистом субстрате [4]. При этом обнаруживаются виды, различающиеся по скорости роста, отношению к источникам питания, стратегии развития.

Микробиологические исследования и идентификация биодеструкторов проводилась на факультете биологии педагогического университета им.А.И.Герцена.

Определение видов обнаруженных на каменистых субстратах проводилась после их выделения в чистую культуру (метод разведения капли). Видовую принадлежность большинства полученных изолятов определяли при наличии четко выраженных морфологических особенностей с использованием атласов и определителей

15

отечественных авторов (Мазей Ю.А., 2006). Лишайники и мхи идентифицировали по общепринятым методикам на кафедре ботаники РГПУ им.А.И.Герцена.

**ГЛАВА 3.** РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проведенные исследования показали, что в условиях городской среды процессы разрушения природного камня принимают ускоренный характер и обусловлены комплексным воздействием на субстрат физических, химических и биологических факторов, которые тесно взаимосвязаны. Механическое и химическое выветривание создают благоприятную среду и обстановку для биологического разрушения, которое в свою очередь, усиливает первые два вида выветривания.

На основании проведенных исследований выделены три группы разрушений: абиогенное (физическое и химическое), биогенное и антропогенное.

В работе детального исследованы биопленки, лишайники, мхи и семенные растения, колонизирующие камень в городской среде. Классификация обрастаний гранита отражена на рис.1 (приложение 1).

В зеленых биопленках доминируют аэрофильные водоросли и растительные жгутиконосцы. Эти биопленки покрывают гранитные цоколи зданий, набережные, исторические памятники. На поверхности памятников некрополей чаще всего фиксировали биопленки зеленого цвета с доминирование водорослей из отдела Chlorophyta и типа Phytomastigophora. На памятниках растительные жгутиконосцы и водоросли развиваются в углублениях поверхности (например, в выбитых надписях). Повышенная влажность и затененность создают оптимальные условия для колонизации поверхности гранита микроскопическими водорослями и одноклеточными животными. Зеленые биопленки, покрывающие большую часть памятников некрополей, распределены на гранитах неравномерно. Наиболее плотный зеленый поверхностный налет зафиксирован в местах повышенного увлажнения (потеки дождевой воды). В таких местах часто формируются сплошные зеленые биопленки. Нанесение граффити способствует развитию зеленых биопленок. Растительные жгутиконосцы и водоросли задерживают влагу, что ускоряет деструкцию гранита. Кроме того, их развитие способствует накоплению на поверхности гранита органического вещества, которое используется более агрессивными деструкторами, например микромицетами.

СЭМ исследования показали, что на граните развиваются одноклеточные и многоклеточные (нитчатые) формы водорослей животные жгутиконосцы, инфузории, раковинные амебы, голые амебы (приложение 2).

16

В биопленках серо-черного цвета широко представлены микроскопические грибы, бактерии, животные жгутиконосцы, раковинные амебы, инфузории. Такие биопленки часто формируются по направлению движения влаги, часто покрывают обширную поверхность гранита в местах повышенного увлажнения (приложение 3). Во многих случаях в них преобладают микроколониальные грибы черного цвета. В Санкт-Петербурге они развиваются на набережных, цоколях исторических зданий, поверхности памятников. Атмосферные загрязнения способствуют развитию темноокрашенных грибов. В темных пленках также обнаружены цианобактерии . Такие пленки наблюдали в местах постоянного повышенного увлажнения. Они были выявлены на сооружениях Петропавловской крепости и на многих зданиях в г. Выборг. В составе микробного сообщества преобладали бактерии рода Bacillus.

В результате проведенного микологического исследования в образцах поврежденного гранита, а также в поверхностных биопленках на гранитных памятниках и сооружениях было выявлено 5 видов микроскопических грибов. Доминантами на гранитных набережных являются темноокрашенные грибы Cladosporium sp. Они повсеместно встречались в биопленках на поверхности гранита, в местах деструкции камня, в первичной почве.

Одноклеточные и микроскопические многоклеточные животные часто аккумулируются в местах разрастания мхов, что усиливает деструкцию поверхностного слоя камня. Среди одноклеточных животных доминируют виды:

Таблица 1. Доминирующие виды первичной почвы

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| *Flagellates* (животные жгутиконосцы) | *Testacea* (раковинные амебы) | *Ciliophora* (инфузории) |
| *Polytomella sp.* | *Centropyxis constricta* | *Colpoda elliotti* |
| *Bodo saltans* | *Centropyxis elongata* | *Colpoda cucullus* |
| *Monas sp.* | *Centropyxis plagiostoma* | *Colpoda maupasi* |
|  |  | *Engelmanniella mobilis* |
|  |  | *Frontonia depressa* |
|  |  | *Bryometopus sphagni* |

Среди микроскопических многоклеточных обнаружены представители классов: *Rotatoria, Gastrotricha, Nematoda, Annelida, Arthropoda*.

17

Часто накипные и листовые лишайники покрывают обширную поверхность гранита (приложение 4). Они приурочены к неровностям на поверхности гранита: выветренным участкам, выбоинам, трещинам и сколам. В результате исследования выявлено 5 родов лишайников: *Physcia, Caloplasa, Candelariella, Lesanara, Xanthoria.*

В биологической колонизации набережных участвуют споровые (мхи, плауны, папоротники) и семенные растения (травянистые, кустарниковые и древесные). Из мхов обнаруженных на каменистых субстратах можно отметить: *Dicranum, Leucobrium, Mnium, Ceratodon, Pohlia*.

В результате проведенных исследований всего на гранитных набережных было обнаружено и определено 32 вида высших сосудистых растений. Растения, в основном приурочены к щелям между гранитными блоками. Кроме того, они повсеместно встречаются на выступающих частях набережных – бордюрах, тумбах и местах их стыков с чугунными решетками, высеченных орнаментах, фигурных изображениях. Особенно активно заселяются участки набережных, имеющих хозяйственное значение: швартовочные кольца, знаки, регулирующие движение водного транспорта и др. Наибольшее число видов наблюдается вблизи парков и скверов – источников заноса семян и спор, а также около мостов. Как правило, видовое разнообразие выше на теневой стороне набережной. Растения на набережных могут произрастать как одиночно, так и образовывать сообщества. Наиболее часто встречаемыми являются сообщества – *Senecio vulgaris (*крестовник обыкновенный*)* - *Poligonum aviculare* (спорыш птичий), *Artemisia vulgaris* (полынь обыкновенная) на кузнеченских гранитах, которыми облицованы набережные рек Карповки и Мартынова. Pohlia nutans – Poa pratensis – Salix caprea, встречаются на гранитах – рапакиви, которыми облицованы канал Грибоедова, реки Мойка, Фонтанка и набережные Невы.

Проведенные исследования показали, что гранитные набережные в центральной части Санкт-Петербурга подвергаются заметной биологической колонизации (макро- и микрообрастания), что способствует их постепенному разрушению.

В целом, разнообразие обрастаний горных пород в городской среде уступает аналогичным показателям в природных экосистемах (обнажениях, заброшенных карьерах и др.) при этом в городе особенно заметно доминирование наиболее адаптированных видов, которые составляют основу литобионтных сообществ. Строение этих сообществ может быть использовано в целях биоиндикации состояния городских систем.

18

ВЫВОДЫ:

1. Изучив основные типы разрушения гранита установили, что биологический фактор данного механизма исследован недостаточно.

2. Выявлены и охарактеризованы основные биодеструкторы гранита, приводящие к процессам биоразрушения: цианобактерии, актиномицеты, одноклеточные и микроскопические многоклеточные животные, лишайники, споровые и семенные растения.

3. Идентифицированы формы макро- и микрообрастателей, участвующих в биологической колонизации каменного субстрата.

4. Установлены доминирующие виды обрастателей, которые составляют основу литобионтных сообществ городской среды.

19

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Булах А. Г.* Каменное убранство Петерубрга. Этюды о разном. – СПб.: Сударыня, 1999. - 135 с.
2. *Булах А. Г., Борисов И. В., Гавриленко В. В., Панова Е. Г.* Каменное убранство Петербурга. Книга путешествий. – СПб.: Сударыня, 2002. – 245 с.
3. *Власов Д. Ю., Богомолова Е. В., Зеленская М. С., Горбушина А. А.* Обзор метода исследования грибов, повреждающих памятники архитектуры и искусства // Труды Биологического НИИ СПбГУ «Актуальные проблемы микологии». - №47. – СПб.: СПбГУ, 2001. – с. 88-100.
4. Власов А.Д. Геоэкологические факторы разрушения гранита-рапакиви и особенности его биообрастания в нарушенных экосистемах // Известия РГПУ им. А.И. Герцена. – 2012. – № 153 (2). – С. 39–46.
5. *Няникова Г.Г., Виноградов Е.Я. Bacillus mucilagenosus –* перспективы использования. – СПб. : НИИХ СПбГУ, 2000. – 120 с
6. *Панова Е. Г., Власов Д. Ю., Лоудес Х.* и др. Разрушение камня в условиях городской среды // Каменное убранство Северной Столицы. – СПб.: Копи-Р Групп, 2013. – с. 3-8.
7. *Раилкин А. И.* Процессы колонизации и защита от биообрастания. – СПб.: Издательство СПбГУ, 1998. – 269 с.
8. *Сазанова К. В., Щипарев С. М., Власов Д. Ю.* Образование органических кислот грибами, изолированными с поверхности памятников из камня // микробиология. – 2014. – Т. 83, №5. – С. 525-533.
9. *Теппер Е.* *З., Шильникова В. К., Переверзева Г. И.* Практикум по микробиологии. – М.: Дрофа, 2005. – 256 с.
10. *Тутакова А.* *Я., Романвский В. Р., Булах А. Г., Лир В. Н.* Природный камень в современной архитектуре Санкт-Петербурга. - Л.: Эпиграф, 2011. – 165 с.
11. А.В. Иванов, Ю.И.Полянский и др. Большой практикум по зоологии беспозвоночных, Издательство СПбГУ, 1981.

20

**Приложение 1**

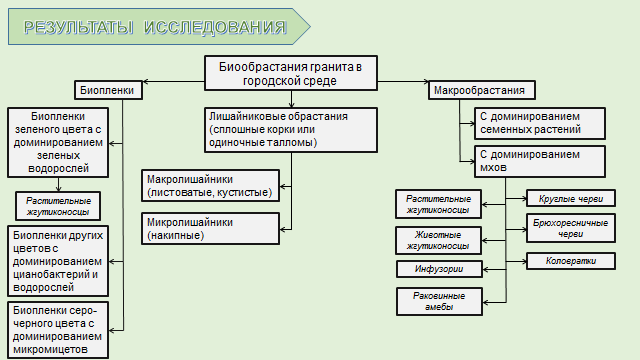
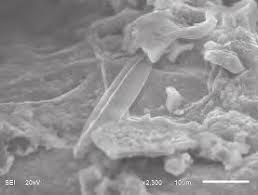
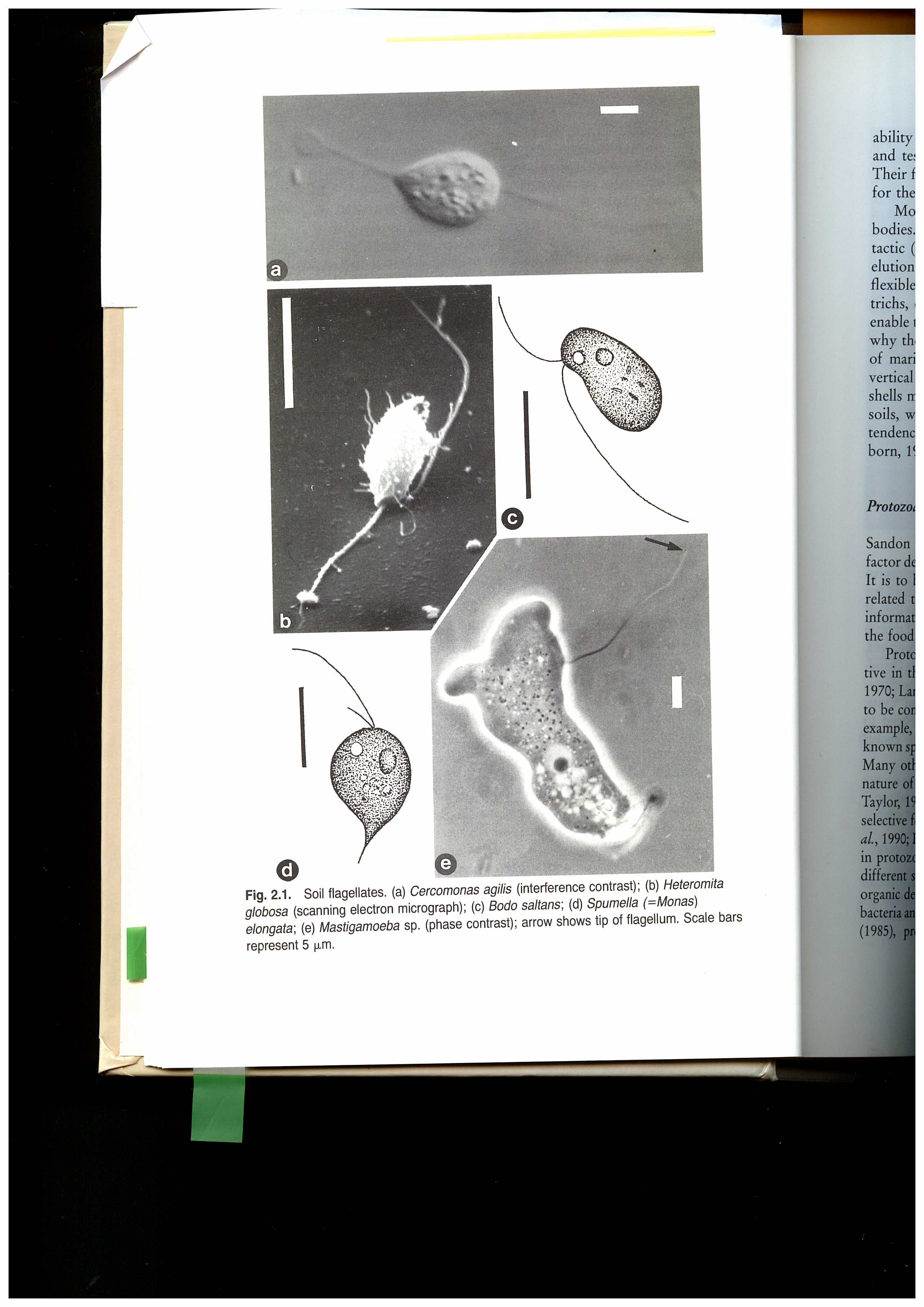


Рис.1. Классификация обрастаний гранита

**Приложение 2**

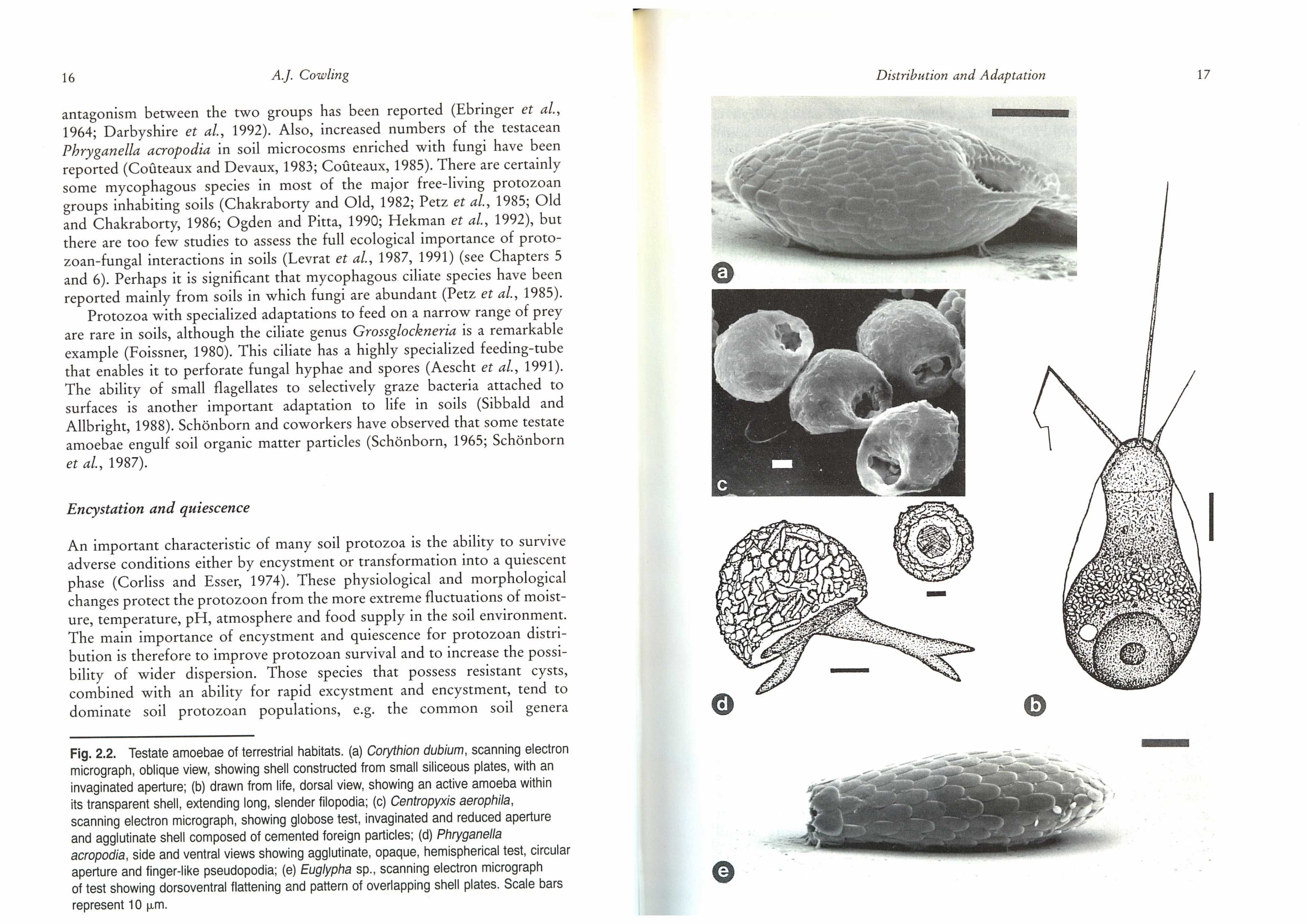


*Клетка диатомовой водоросли (СЭМ)*

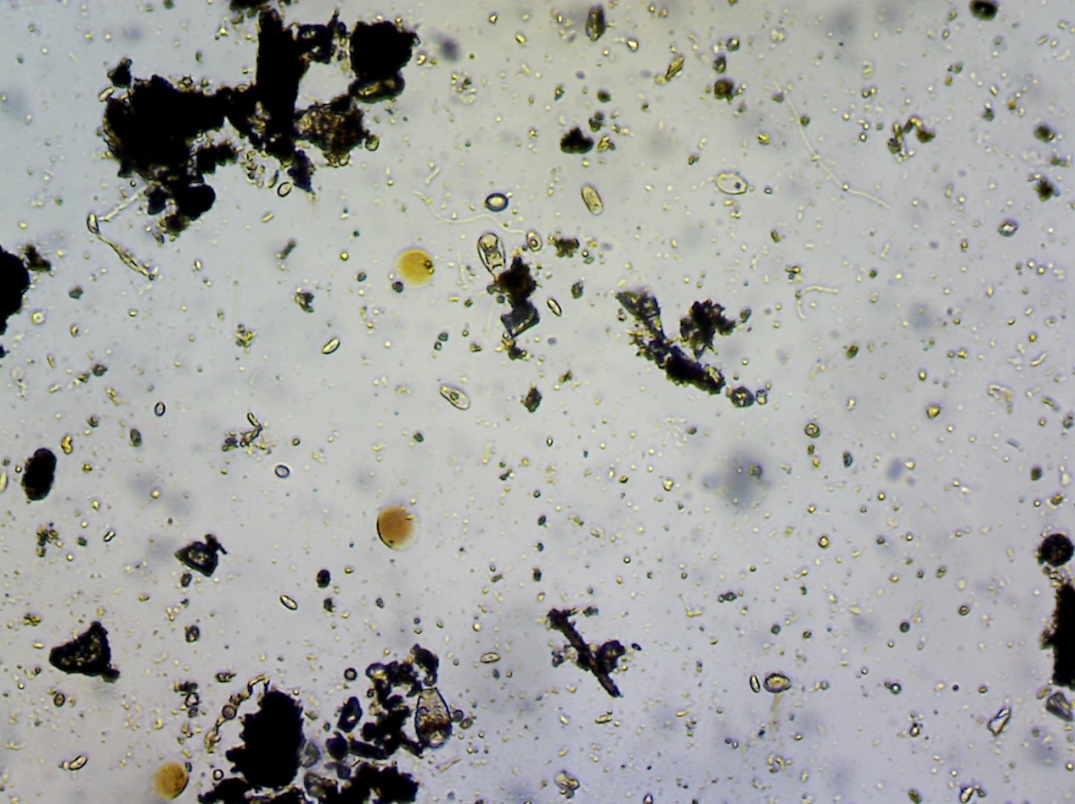


*Животный жгутиконосец рода Polytomella (СЭМ)*

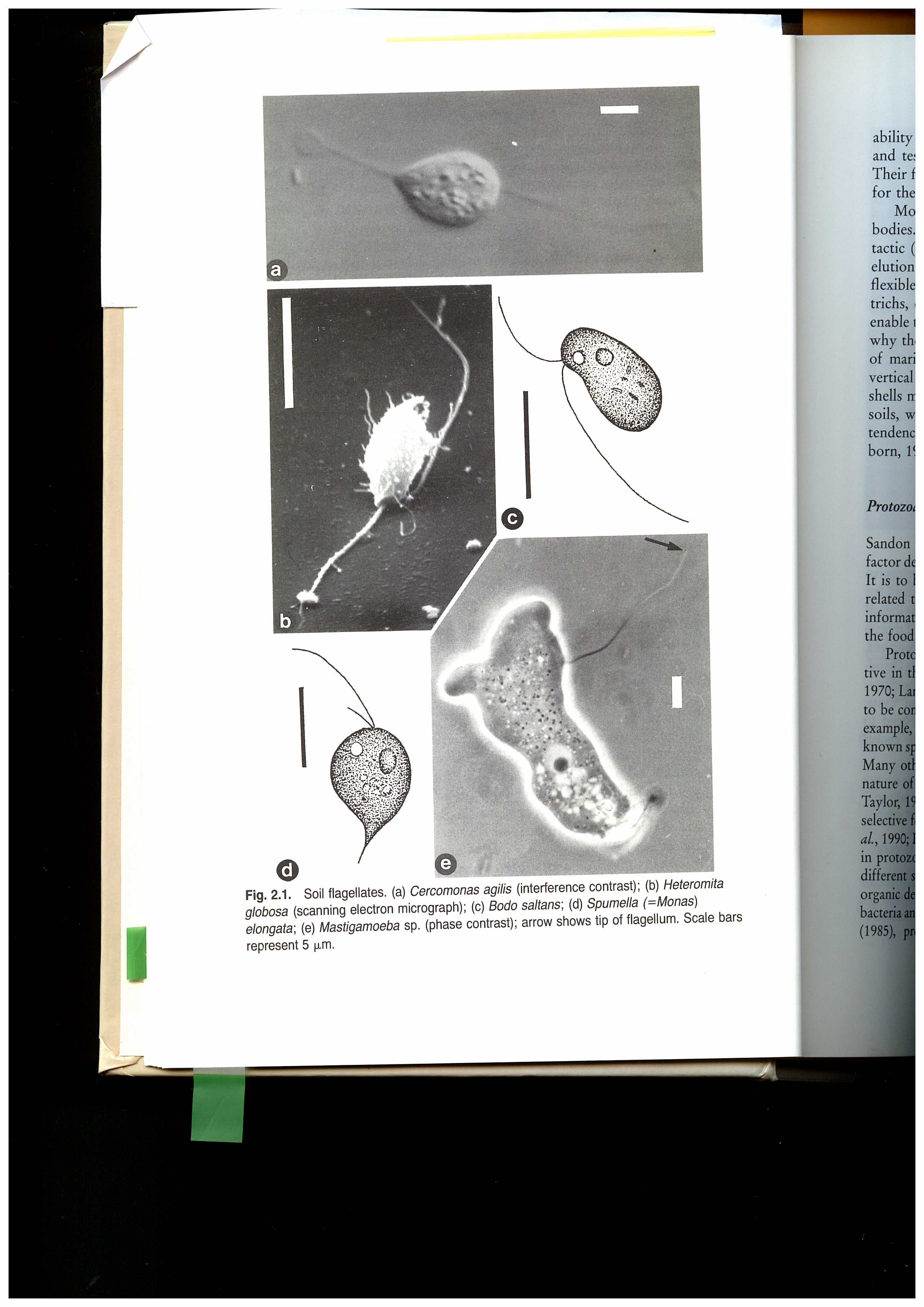
21



*Раковинные амебы рода Centropyxis (СЭМ)*



*Раковинные амебы (кл. Testacea), ув. 15х40*



*«Голая» амеба (Mastigamoeba sp.) (СЭМ)*

**Приложение 3**



*Биопленка серо-черного цвета на граните*

**Приложение 4**



*Лишайниковые обрастания камней*

23