

Всероссийский конкурс юных исследователей окружающей среды  
имени Б.В. Всесвятского (с международным участием)

Номинация «Прикладная клеточная биология, биотехнология, генетика и  
селекция»

**Азотобактерии как перспективный объект для получения биопластиков**

Автор работы: Клепинина Евгения Александровна, 9 класс;  
Специализированный учебно-научный центр федерального государственного  
автономного образовательного учреждения высшего образования «Уральский  
федеральный университет имени первого Президента России Б.Н. Ельцина,  
(СУНЦ УрФУ)

Руководитель: Шабалина Анна Андреевна,  
учитель химии и биологии  
СУНЦ УрФУ

## Оглавление

Введение	3
Глава 1. Полимеры и биополимеры	5
Глава 2. Разновидности биополимеров	6
Глава 3. Способы получения биополимеров на основе Азотобактерий	7
Глава 4. Накопление ПГА Азотобактериями	9
Глава 5. Особенности ПГА и применение биопластика на основе ПГА	10
Глава 6. Материалы и методы	11
Глава 7. Результаты и их обсуждения	14
Заключение	16
Список литературы	17
Приложения	21

## Введение

Полимерные материалы играют ключевую роль в жизни современного общества, и их производство и потребление продолжают расти [13]. В настоящее время основным сырьем для производства большинства полимеров и пластиков служит сырая нефть. Однако при текущем уровне потребления запасы нефти на Земле могут исчерпаться до 2050 года. Ученые прогнозируют, что нефтяные запасы рано или поздно закончатся, мнения различаются только относительно скорости этого процесса. Ежегодно из нефти синтезируется более 300 миллионов тонн пластмасс [13]. Проблема утилизации полимерных отходов также становится все более актуальной: ежегодно в океан попадает около 10 миллионов тонн пластика, что негативно сказывается на экосистемах [14].

Спрос на пластмассы растет из-за увеличения населения и модернизации, что может привести к серьезным экологическим последствиям. Переработка пластика, хотя и является предпочтительным способом обращения с отходами, сталкивается с трудностями из-за разнообразия пластиков [2].

Таким образом, **проблема** ограниченности сырья для производства пластика и накопление огромного количества пластикового мусора, загрязняющего нашу планету, вызывает острую необходимость перехода на биопластики. Биопластики – это новые материалы, которые могут естественным образом разлагаться без вреда для окружающей среды. Это биополимеры, получаемые из природного сырья или синтезируемые микроорганизмами, которые не способствуют увеличению парниковых газов [7], что делает их перспективной альтернативой традиционным пластикам.

**Актуальность и практическая значимость** нашего исследования заключается в том, что в настоящее время биопластики еще плохо изучены и составляют около 0,5% от общего объема производства пластмасс [7]. Таким образом научный поиск биологических объектов, которые будут перспективными для продукции биополимеров и получения биопластиков очень актуален в современных условиях.

**Новизна работы.** Уже сейчас учеными используются цианобактерии как биофабрики для производства экологически чистого пластика, преобразуя

углекислый газ и солнечный свет в биоматериалы [20]. В настоящее время биопластики на основе полигидроксиалканоатов (ПГА) микроорганизмов используются в медицине как материал для хирургических швов, способных разлагаться в организме человека [23]. В своем проекте мы исследуем азотобактерии, выделенные из разных почв, на способность к производству ПГА – биополимера для производства биопластика.

Мы выдвинули **гипотезу**: азотобактерии, изолированные из различных источников окружающей среды, способны накапливать полигидроксиалканоаты (ПГА) в условиях несбалансированного питания, что делает их перспективными кандидатами для производства биоразлагаемых пластиков.

**Объект исследования:** бактериальные изоляты, относящиеся к роду *Azotobacter*, выделенные из почв и техногенных грунтов.

**Предмет исследования:** способность азотобактерий накапливать полигидроксиалканоаты (ПГА) в зависимости от условий среды обитания, а также методы их скрининга и идентификации как потенциальных производителей ПГА.

**Цель:** исследование бактерий рода *Azotobacter* из разных почв и техногенных грунтов на способность накапливать полигидроксиалканоаты (ПГА).

**Задачи:**

1. Культивировать бактерии рода *Azotobacter* из разнообразных почвенных образцов и пронаблюдать за активностью их роста;
2. Провести скрининг изолятов азотобактерий на продукцию ПГА: использовать метод окрашивания Суданом черным для выявления бактериальных изолятов, способных накапливать ПГА.
3. Выбрать наиболее перспективные колонии бактерий по накоплению ПГА и отправить их для дальнейшего изучения в Институт химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН в рамках программы научного волонтерства.

## Глава 1. Полимеры и биополимеры

Полимеры (от греч. *polymeres* — состоящий из многих частей, многообразный), химические соединения с высокой молекулярной массой (от нескольких тысяч до многих миллионов), молекулы которых (макромолекулы) состоят из большого числа повторяющихся группировок (мономерных звеньев). Атомы, входящие в состав макромолекул, соединены друг с другом силами главных и (или) координационных валентностей [3].

В жизни обычного человека полимеры – это упаковочные пленки, которые плохо разлагаются, но используются повсеместно, тем самым очень сильно засоряя экосистему. Наиболее эффективным способом уменьшения полимерных отходов является создание биоразлагаемых полимеров. Эти полимеры сохраняют свои эксплуатационные характеристики только на протяжении периода использования, после чего под воздействием факторов окружающей среды (таких как свет, температура и влага) они подвергаются физико- химическим и биологическим изменениям. В результате этого процесса высокомолекулярные соединения распадаются на низкомолекулярные вещества, такие как вода и углекислый газ, а также образуются гуминовые вещества и биомасса. Таким образом, происходит естественный круговорот веществ, который помогает поддерживать экологическое равновесие в природе [4].

## Глава 2. Разновидности биополимеров

Существуют различные виды биополимеров [23]:

- Растительные биополимеры: включают целлюлозу, крахмал, лигнин и гемицеллюлозу. Эти полимеры часто используются в упаковке, строительстве и производстве бумаги.

- Микробные биополимеры: к ним относятся экзополисахариды (например, альгинаты, ксантан) и полигидроксиалканоаты (PHA), которые производятся микроорганизмами. Они находят применение в медицине и пищевой промышленности.

Растительные биополимеры представляют собой устойчивый и экологически чистый класс материалов, которые получают из возобновляемых растительных источников. Они являются биоразлагаемой альтернативой традиционным полимерам на основе нефти и синтетических материалов, что способствует снижению зависимости от химикатов и конечных ресурсов ископаемого топлива.

Среди наиболее распространенных растительных биополимеров можно выделить целлюлозу, хитозан и крахмал, которые извлекаются из различных растений, таких как пшеница, рис и картофель. Эти материалы обладают такими полезными свойствами, как биоразлагаемость, биосовместимость и возможность индивидуальной функционализации.

Благодаря этим характеристикам растительные биополимеры все чаще находят применение в различных отраслях, включая упаковку, сельское хозяйство, средства личной гигиены и биомедицинские приложения. Их использование способствует созданию более устойчивых и экологически безопасных решений для современных потребностей [23].

Помимо растений, микроорганизмы также служат хорошим кандидатом для получения различных типов биополимеров. Микробные полимеры также различаются, наиболее популярными являются пуллулан, леван, курдлан, целлюлозу, ксантановую камедь, полигидроксиалканоат, полигидроксибутират [18].

### Глава 3. Способы получения биополимеров на основе Азотобактерий

Азотобактерии продуцируют биополимеры на основе бактериальной целлюлозы. Это экзополисахарид с волокнами диаметром от 20 до 100 нм, вырабатываемый многочисленными видами бактерий, такими как *Agrobacterium*, *Aerobacter*, *Achromobacter*, *Alcaligenes*, *Azotobacter*, *Gluconacetobacter* и *Sarcina* и т. Д. [11]. Ключевыми генами, участвующими в биосинтезе бактериальной целлюлозы, являются *bcsA*, *bcsB* и *bcsC*. Эти гены производят белки, которые составляют комплекс целлюлозосинтазы, необходимый для полимеризации глюкозы в целлюлозные цепи [12].

Бактериальная целлюлоза обладает исключительной водоудерживающей способностью благодаря своей высокой гидрофильности и большому соотношению площади поверхности к массе. Более того, она демонстрирует впечатляющую механическую прочность, высокую кристалличность и экономически эффективное производство. Она более приемлема, чем растительная целлюлоза, поскольку не содержит пектина, гемицеллюлозы и лигнина, а проводить ее очистку намного проще, чем у растительной целлюлозы [12].

Азотобактерии фиксируют до 10–30% общего азота в ризосфере [10]. Фиксация азота может осуществляться в условиях окружающей среды любой из трех высокоспециализированных металл-зависимых нитрогеназ. Нитрогеназы производят высокие концентрации фиксированного аммония, который выделяется и служит важным питательным веществом для других организмов. Однако активность этих ферментов очень чувствительна к молекулярному кислороду и энергетически затратна. Одним из наиболее изученных механизмов защиты нитрогеназы является биосинтез альгината. Альгинат транспортируется во внеклеточное пространство, где он работает как барьер, который снижает диффузию кислорода в цитоплазму и поддерживает высокую функциональность чувствительных к кислороду нитрогеназ в бескислородных средах [17].

Альгинат имеет большое промышленное значение из-за его использования в качестве биосовместимого и биоразлагаемого экзополисахарида. Этот полимер используется в качестве стабилизирующего, загущающего или образующего гель-пленку агента в пищевой и фармацевтической промышленности.

#### Глава 4. Накопление ПГА Азотобактериями

*Azotobacter* — это род свободноживущих азотфиксирующих бактерий, которые играют важную роль в экосистемах, особенно в агрономии и биотехнологии. Они способны фиксировать атмосферный азот и преобразовывать его в доступные для растений формы, что делает их ценными для сельского хозяйства. Одним из интересных аспектов их метаболизма является способность вырабатывать полигидроксиалканоаты (ПГА) [1].

ПГА — это биополимеры, которые могут служить источником углерода и энергии для бактерий. Они обладают свойствами, схожими с пластиками, и могут использоваться в качестве экологически чистых заменителей синтетических полимеров. ПГА имеют широкий спектр применения, включая упаковку, медицину и сельское хозяйство.

Азотобактерии способны использовать углеродные источники (например, глюкозу, ацетат) для синтеза ПГА. В процессе метаболизма они накапливают ПГА в виде гранул внутри клеток [1].

Для оптимального производства ПГА необходимо учитывать такие факторы, как:

- Наличие углеродного источника.
- Концентрация азота.
- Температура и pH среды.
- Наличие микроэлементов и витаминов.

## Глава 5. Особенности ПГА и применение биопластика на основе ПГА

1. Переработка при высоких температурах: ПГА может быть переработан при высоких температурах, что делает его удобным для формования. Это свойство позволяет создавать изделия сложной формы и структуры, что особенно важно в производстве медицинских устройств и упаковки. Высокая термопластичность полимера позволяет легко его обрабатывать, обеспечивая высокую точность и качество конечного продукта [20].

2. Высокая прочность на сжатие и растяжение: ПГА обладает выдающейся прочностью как на сжатие, так и на растяжение. Эти механические свойства делают его идеальным выбором в медицинских приложениях, где требуется надежный шовный материал. ПГА хорошо совместим с живыми тканями, что минимизирует риск отторжения и способствует быстрому заживлению после хирургических вмешательств [24].

3. Низкая токсичность и экологическая безопасность: ПГА не токсичен и не оказывает негативного влияния на окружающую среду. Он разлагается на воду и углекислый газ в течение 7-10 недель при температуре 20-60 градусов Цельсия и влажности 85%. Это делает ПГА предпочтительным материалом для использования в медицинских и упаковочных приложениях, так как он не оставляет вредных остатков и не загрязняет природу [22].

4. Хорошие барьерные свойства: полигидроксиалканоаты обладают отличными барьерными свойствами к газам и влаге, что делает ее идеальной для упаковки продуктов питания. Эти свойства помогают продлить срок хранения продуктов, защищая их от внешних факторов, таких как кислород и влага, которые могут привести к порче [21].

Соответственно, ПГА применяются в следующих областях:

- Медицина: ПГА используется как шовный материал для хирургических процедур, включая операции на мягких тканях, где требуется высокая прочность шва и биосовместимость.

- Сельское хозяйство: ПГА может служить источником углерода для почвенных микроорганизмов, улучшая структуру почвы и способствуя ее плодородию. Кроме того, он помогает удерживать влагу в почве, что особенно

важно в условиях засухи.

- Упаковка: благодаря своим барьерным свойствам и экологичности, ПГА активно используется в упаковке продуктов питания, а также в производстве упаковки для других товаров, требующих защиты от влаги и газов [24].

## Глава 6. Материалы и методы исследования

Эксперимент по культивированию и скринингу *Azotobacter* на продукцию полигидроксиалканоатов (ПГА) провели в лаборатории СУНЦ УрФУ в октябре 2025 года.

### Сбор почвенных образцов

Отбрали и высушили пробы почв: почвы из сельскохозяйственных угодий, лесов, промышленных зон (Таблица 1, прил. 1).

Образцы почвы были собраны с глубины 5-10 см в трех полевых повторностях.

### Приготовление Среды Эшби

1. Для культивирования азотобактерий выбрали безазотную среду Эшби, так как на ней смогут жить и размножаться только те бактерии, которые способны к фиксации азота из атмосферного воздуха. Мы сделали навески всех сухих компонентов. (рис. 3, прил. 1) Материалы для приготовления агаризированной среды Эшби:

- Глюкоза: 8 г
- $\text{CaCO}_3$ : 2 г
- $\text{NaCl}$ : 0,1 г
- $\text{K}_2\text{HPO}_4$ : 0,1 г
- $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ : 0,1 г
- Агар: 6 г
- $\text{K}_2\text{SO}_4$ : 0,05 г
- Дистиллированная вода: 1 литр

Мы приготовили питательную среду Эшби. В чистую колбу добавили все сухие компоненты, добавили 1000 мл дистиллированной воды. Хорошо перемешали и варили на электрической плитке до полного растворения агара.

Разлили по стерильным чашкам

Петри, остудили. (рис. 4, 5, прил. 2)

### Культивирование Азотобактерий

2. Увлажнили почвы и разлили питательный агар по стерильным чашкам Петри

(рис. 5, 6, прил. 3)

3. В асептических условиях на подготовленную агаризованную среду культивировали Азотобактерии: из увлажненной почвы отделили 50 комочков диаметром 3-4 миллиметра и разместили комочки на узлы заранее приготовленного трафарета, находящегося под чашкой Петри с прозрачной застывшей средой Эшби. Всего было приготовлено 15 чашек Петри, по 2 на каждую почвенную пробу для точности результатов и одна контрольная, залитая только средой Эшби для проверки стерильности условий (рис. 8, прил. 3).
4. Инкубировали 6 суток при температуре 24 градуса.
5. После инкубации чашек Петри вокруг почвенных комочков наблюдали рост слизистых колоний (рис. 9, 10, прил. 4).

#### **Скрининг изолятов на выработку ПГА**

6. Через 6 дней провели наблюдения, посчитав прозрачные желейные образования азотобактерий вокруг комочков почв. После этого мы взяли наилучшие, большие обрастания и провели скрининг, окрашивание колоний азотобактер Суданом черным по методике индийских ученых Anuradha Jare, Abhay Harsulkar and V.R. Sapre [5].
7. Подготовили этаноловый 0.05% раствор Судан Блэк В. Сделали мазки колоний на предметные стекла, присвоили им уникальные номера. (рис.11, прил. 5) Распределили раствор красителя по бактериальным мазкам на предметных стеклышках и оставили на 30 минут. После промыли изопропанолом (96%) для удаления излишков красителя. (рис. 12, 13, прил. 5) Провели наблюдения за колониями: темно- синие колонии считаются положительными на продукцию ПГА. (рис.14, прил. 5)

Этапы работы над проектом представлены на рисунке 1.

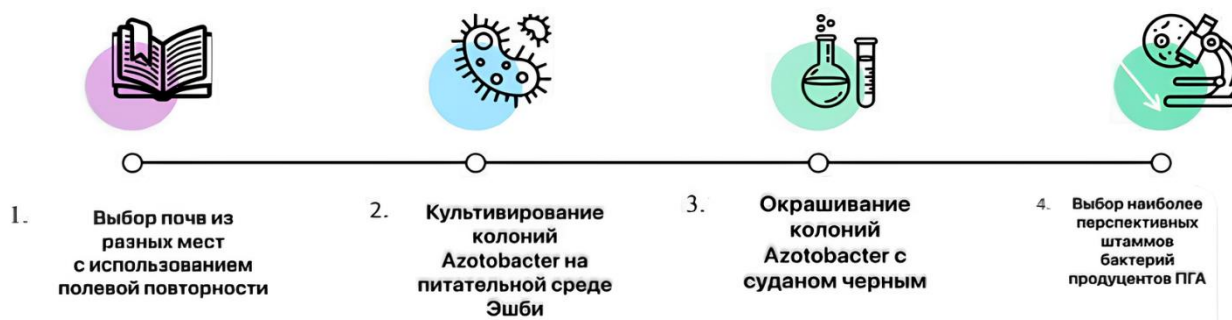


Рис. 1. Этапы работы над проектом

## Глава 7. Результаты и их обсуждение

Результаты эксперимента по наблюдению за активностью роста *Azotobacter* из различных почв в питательной среде Эшби представлены в диаграмме(рис.2)

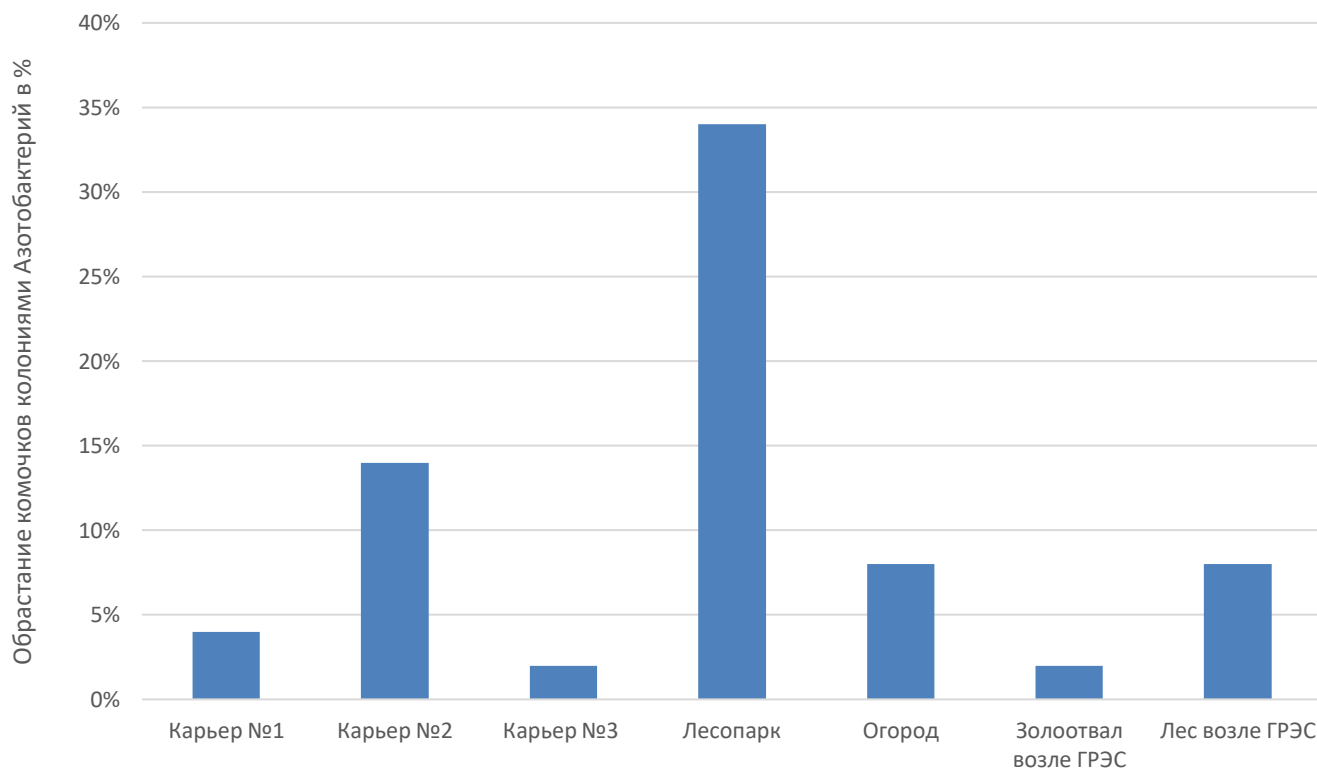


Рис. 2. Активность обрастаний почвенных комочков колониями бактерий

Наибольший прирост (34%) колоний Азотобактерий наблюдали в ненарушенной почве из Шарташского лесопарка.

Наименьший рост Азотобактерий наблюдался в почвах, восстановившихся после добычи гранита в зарастающем карьере №3 и в грунте с рекультивированного золоотвала ГРЭС. В почвах из леса возле ГРЭС, где есть загрязнение золой и в почве из огорода, которую интенсивно возделывают на протяжении многих лет, наблюдали одинаковую активность Азотобактерий (8%) Таким образом, в почвах из естественных экосистем (смешанный лес в Шарташском лесопарке) Азотобактерии наиболее активны, чем в почвах с промышленной нагрузкой.

Провели скрининг колоний бактерий с помощью красителя Судан черный. Структуры полимера связываются с красителем и, чем ярче окраска, тем больше полимеров накоплено конкретными бактериальными колониями. По результатам скрининга наибольшие показатели по накоплению ПГА наблюдали у Азотобактерий из грунта золоотвала Рефтинской ГРЭС (проба № 6, колония 6.3.) и из леса возле золоотвала (проба № 7, колония 7.3.) (рис. 9, 10, прил. 4) – это техногенные почвы, в которых содержится много золы. Зола с данной электростанции представляет из себя продукты сгорания угля, в основном оксиды. Химические элементы, необходимые для функционирования клеток, такие как фосфор, сера, калий, кальций, железо и другие – находятся в нерастворимой, недоступной для усвоения клетками форме (таблица 2, прил. 6). Таким образом, в почвах с недостатком питательных веществ наблюдается интенсивное накопление ПГА бактериями по сравнению с остальными почвами.

Наши наблюдения согласуются с исследованиями других исследователей. При культивировании бактериальных изолятов на средах, бедных питательными веществами, наблюдалось повышенное накопление ПГА [19]. Возможно, это связано с неблагоприятными условиями из-за чего происходит активный метаболизм и накопление ПГА.

### **Выводы**

В результате проделанной работы можно сформулировать следующие выводы:

1. Культивировали *Azotobacter* и наблюдали за активностью роста: на почвах не нарушенных наблюдали наибольший рост бактерий (34%), а на техногенных почвах – наименьший (2%). Это показывает, что на богатых

питательными веществами почвах азотобактерии растут быстрее, чем в почвах с техногенными включениями от производств и сниженным содержанием доступных элементов питания.

2. По результатам скрининга выявили, что наибольшим накоплением биополимеров обладают бактерии из техногенных почв с низким содержанием питательных веществ. Оказавшись в благоприятных условиях питательной среды, они продолжали накапливать запасное вещество более эффективно, чем бактерии, привыкшие к большому количеству питательных веществ.
3. Обнаружили уникальные колонии, наиболее перспективные по накоплению ПГА: колонии 6.3. и 7.3. Сделали пересев бактерий в транспортные пробирки и отправили на дальнейшие исследования ученым в Новосибирск. Возможно, в дальнейшем из них будут выведены штаммы Азотобактерий для производства биопластиков.

## **Заключение**

Таким образом, наше исследование имеет высокую актуальность и показывает, что азотобактерии можно использовать в качестве продуцентов биопластика.

В нашем исследовании мы получили результаты, схожие с результатами других ученых [20], однако мы выявили, что азотобактерии, изолированные из бедных питательных почв, лучше накапливают ПГА.

Предположенная гипотеза подтвердилась и азотобактерии, изолированные из различных источников окружающей среды, способны накапливать полигидроксиалканоаты (ПГА) в условиях несбалансированного питания, что делает их перспективными кандидатами для производства биоразлагаемых пластиков.

Кроме этого мы внесли вклад в развитие российской науки в качестве научных волонтеров.

### **Перспектива развития проекта**

- Провести эксперимент в луночном планшете, окрасить суданом черным нативные колонии бактерий из сред богатых и бедных питательными веществами и выявить наиболее перспективных продуцентов ПГА. Оценить интенсивность окраски с помощью спектрофотометра.
- Провести эксперименты по определению прочности и скорости разложения полученных биопластиков.

## Список литературы

1. Азотобактер // А — Ангоб. — М.: Советская энциклопедия, 1969. Большая советская энциклопедия: [в 30 т.] / гл. ред. Прохоров А.П.; 1969—1978, т.1).
2. Пластиковый мусор и микропластик в Мировом океане. Глобальное предостережение и исследование, призыв к действиям и руководство по изменению направления политики. ЮНЕП, 2016, Найроби / UNEP (2016). Marine plastic debris and microplastics – Global lessons and research to inspire action and guide policy change. United Nations Environment Programme, Nairobi.
3. Полимеры / [Электронный ресурс] // volgahimplast : [сайт]. — URL: <https://www.volgahimplast.ru/info/articles/polimery/polymer-4/> (дата обращения: 10.01.2026).
4. Трофимчук С., Поцелеев В. В., М. А. Хавпачев, Москвина М. А., Никонорова Н. И. Высокомолекулярные соединения / Трофимчук С., Поцелеев В. В., Хавпачев М. А., Москвина М. А., Никонорова Н. И. [Текст] // Пористые материалы на основе полилактида: получение, особенности гидролитической деструкции и области применения. — Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова. Химический факультет 119991 Москва, Ленинские горы, 1, стр. 3, Россия: 2021. —С.190-211.
5. Anuradha Jape1, Abhay Harsulkar and Sapre V.R. Modified Sudan Black B staining method for rapid screening of oleaginous marine yeasts [Текст] / Anuradha Jape1, Abhay Harsulkar and V.R.Sapre // International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences. — 2014. — № 9. — С. 41-46.
6. Baptist J. N. Molded product containing poly- $\beta$ -hydroxybutyric acid and method of making // US Patent № 3 107 172. – 1963.
7. Bioplastics market development update2025 // european-bioplastics URL: <https://www.european-bioplastics.org/market/> (дата обращения: 20.01.2026).
8. Bissery M. C., Puisieux F., Thies C. A study of process parameters in the making of microspheres by the solvent evaporation procedure // Third Exp. Cong. Int Technol. Pharm. – 1983. – V. 3. – P. 233–239.

9. Bissery M. C., Valeriale F., Thies C. In vitro and in vivo evaluation of CGNUloaded microspheres prepared from polylactide and polyhydroxybutyrate //In: Microspheres and Drug Therapy. Pharmacocological, Immunological and Medical Aspects (S. S. Davis, L. Illum, J. G. McVie, E. Tomlinson, eds.). Amsterdam: Elsevier. – 1984a. – P. 217–227.
10. Cristina Mihaela Nicolescu, Marius Bumbac, Claudia Lavinia Buruleanu, Elena Corina Popescu, Sorina Geanina Stanescu, Andreea Antonia Georgescu, Siramona Maria Toma Biopolymers Produced by Lactic Acid Bacteria: Characterization and Food Application / Cristina Mihaela Nicolescu, Marius Bumbac, Claudia Lavinia Buruleanu, Elena Corina Popescu, Sorina Geanina Stanescu, Andreea Antonia Georgescu, Siramona Maria Toma [Электронный ресурс] // National library of medicine: [сайт]. — URL: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10058920/> (дата обращения: 15.01.2026).
11. Dehui Lin, Zhe Liu, Rui Shen, Siqian Chen, Xingbin Yang Bacterial cellulose in food industry: Current research and future prospects / Dehui Lin, Zhe Liu, Rui Shen, Siqian Chen, Xingbin Yang [Электронный ресурс] // sciencedirect: [сайт]. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0141813020330968> (дата обращения: 20.01.2026).
12. Diego Tec-Campos a b, Cristal Zuñiga a, Anurag Passi a, John Del Toro c, Juan D. Tibocha- Bonilla d, Alejandro Zepeda b, Michael J. Betenbaugh c, Karsten Zengler Modeling of nitrogen fixation and polymer production in the heterotrophic diazotroph *Azotobacter vinelandii* DJ / Diego Tec-Campos a b, Cristal Zuñiga a, Anurag Passi a, John Del Toro c, Juan D. Tibocha-Bonilla d, Alejandro Zepeda b, Michael J. Betenbaugh c, Karsten Zengler [Электронный ресурс] // sciencedirect : [сайт]. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214030120300043> (дата обращения: 20.01.2026).
13. Global plastics production / [Электронный ресурс] // our world in data : [сайт]. — URL: <https://ourworldindata.org/grapher/global-plastics->

- production (дата обращения: 20.01.2026).
14. How much plastic waste ends up in the ocean? / [Электронный ресурс] // our world in data: [сайт]. — URL: <https://ourworldindata.org/how-much-plastic-waste-ends-up-in-the-ocean> (дата обращения: 19.01.2026).
  15. Kassab A. Ch., Xu K., Denkbaz E. B., Dou Y., Zhang S., Piskin E. Riphampicin carrying polyhydroxybutyrate microspheres as potential chemoembolization agent // J. Biomater. Sci. Polymer Edn. – 1997. – V. 8 – P. 947–961.
  16. Logeshwaran Vellingiri Production Of Microbial Biopolymers And Its Application-A Review / Logeshwaran Vellingiri [Электронный ресурс] // researchgate: [сайт]. — URL: [https://www.researchgate.net/publication/376272530\\_Production\\_Of\\_Microbial\\_Biopolymers\\_And\\_Its\\_Application-A\\_Review](https://www.researchgate.net/publication/376272530_Production_Of_Microbial_Biopolymers_And_Its_Application-A_Review) (дата обращения: 19.01.2026).
  17. Melene Thompson, Maureen C Onyeziri, Clay Fuqua Function and Regulation of Agrobacterium tumefaciens Cell Surface Structures That Promote Attachment / Melene Thompson, Maureen C Onyeziri, Clay Fuqua [Электронный ресурс] // National library of medicine: [сайт]. — URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC6330146/> (дата обращения: 19.01.2026).
  18. Michael Greenwood, M.Sc. Production of Biopolymers by Microorganisms / Michael Greenwood, M.Sc. [Электронный ресурс] // news-medical: [сайт]. — URL: <https://www.news-medical.net/life-sciences/Production-of-Biopolymers-by-Microorganisms.aspx> (дата обращения: 20.01.2026).
  19. Mohammed Tohaa Qureshi, Wahida Rehman Shaikh and Shahana Khan Optimization of PHA Production by Azotobacter fabrum Isolated from Soil Sample [Текст] / Mohammed Tohaa Qureshi, Wahida Rehman Shaikh and Shahana Khan // international journal of pure and applied bioscience. — 2015. — № 2320 – 7051. — С. 281-290.
  20. New biodegradable plastics are compostable in your backyard // washington.edu URL: <https://www.washington.edu/news/2023/07/10/new->

biodegradable-plastics-compostable-in-your-backyard/ (дата обращения: 20.01.2026).

21. Poltronieri, P., & Kumar, P. (2017). Polyhydroxyalcanoates (PHAs) in Industrial Applications. *Handbook of Ecomaterials*, 1–30
22. Pouton C. W., Akhtar S. Biosynthetic polyhydroxyalkanoates and their potential in drug delivery // *Adv. Drug. Delivery Rev.* – 1996. – V. 18. – P. 133–162.
23. Rajwinder Kaur, Loveena Pathak & Pratibha Vyas Biobased polymers of plant and microbial origin and their applications / Rajwinder Kaur, Loveena Pathak & Pratibha Vyas [Электронный ресурс] // *Biotechnology for Sustainable Materials*: [сайт]. — URL: <https://biotechsustainablematerials.biomedcentral.com/articles/10.1186/s44316-024-00014-x> (дата обращения: 11.01.2026).
24. Sagong, Hye-Young; Son, Hyeoncheol Francis; Choi, So Young; Lee, Sang Yup; Kim, Kyung-Jin (2018). *Structural Insights into Polyhydroxyalkanoates Biosynthesis. Trends in Biochemical Sciences*
25. Tarek Rouissi, Nihed Tellili, Mohit Sharma, Imen Kasem Microbial Biopolymers: From Production to Environmental Applications / Tarek Rouissi, Nihed Tellili, Mohit Sharma, Imen Kasem [Электронный ресурс] // *mdpi* : [сайт]. — URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/14/12/5081> (дата обращения: 10.01.2026).

## Приложения

## Приложение 1

Таблица 1. Места отбора почвенных проб и особенности почв

№ пробы	Место отбора	Характеристика почвы
1	Шарташский карьер № 1	Почва образовалась в гранитном карьере, который разрабатывали в конце 19 - начале 20 века. Сейчас карьер зарастает лесом. Слой почвы 4-5 см, механический состав супесчаный
2	Шарташский карьер № 2	
3	Шарташский карьер № 3	
4	Смешанный лес в Шарташском лесопарке	Почва из естественной экосистемы без техногенной нагрузки. Хорошо выражен гумусовый слой, что говорит о большом количестве органических веществ. Механический состав суглинистый
5	Огород частного дома	Плодородная удобренная почва. Механический состав суглинистый
6	Рекультивированный золоотвал Рефтинской ГРЭС	Техногенный грунт, сформированный после рекультивации золоотвала сосновыми лесопосадками в 2005-2007 годах. Гумусовый слой слабо выражен, грунт состоит из золы и небольшого количества глинистой почвы, завезенной при рекультивации. Механический состав песчаный
7	Смешанный лес возле Рефтинской ГРЭС	Почва из естественной экосистемы с высокой техногенной нагрузкой. На почвенном срезе видны слои золы, которую приносит ветром с электростанции. Механический состав супесчаный

### Приготовление питательной среды Эшби



Рис. 3 – Приготовление навески компонентов

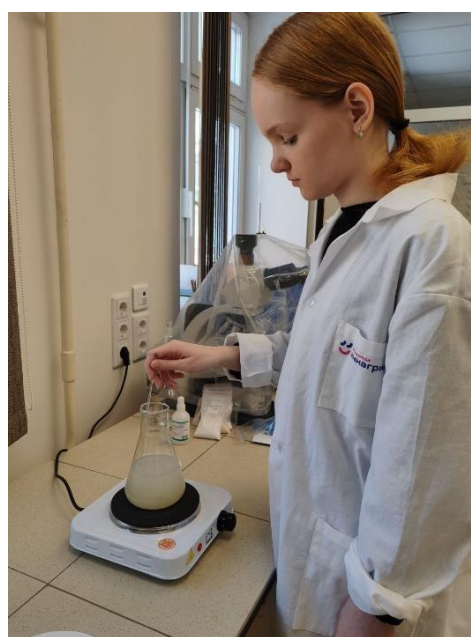


Рис. 4, 5 – Приготовление раствора солей и питательного агара

### Посев почвенных комочков на среду Эшби

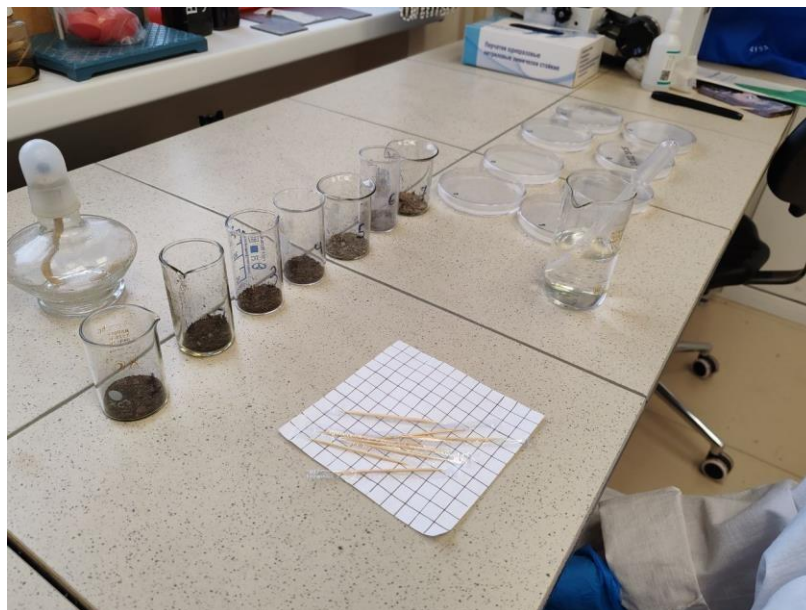


Рис. 6 – Подготовленные почвы и чашки Петри с питательным агаром



Рис. 7 – Увлажнение почвы

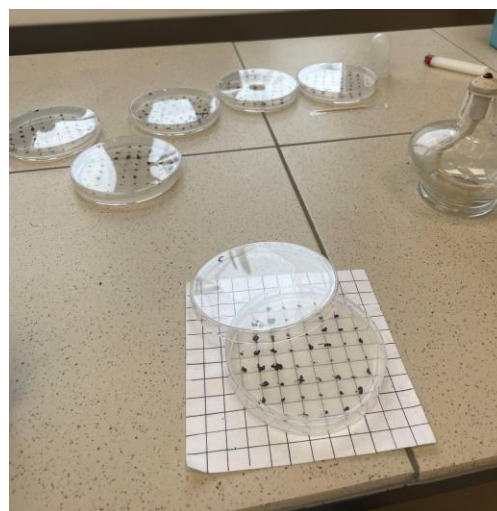


Рис. 8 – По трафарету внесение  
50 комочков почвы на  
агар

### Обрастания комочков колониями Азотобактера

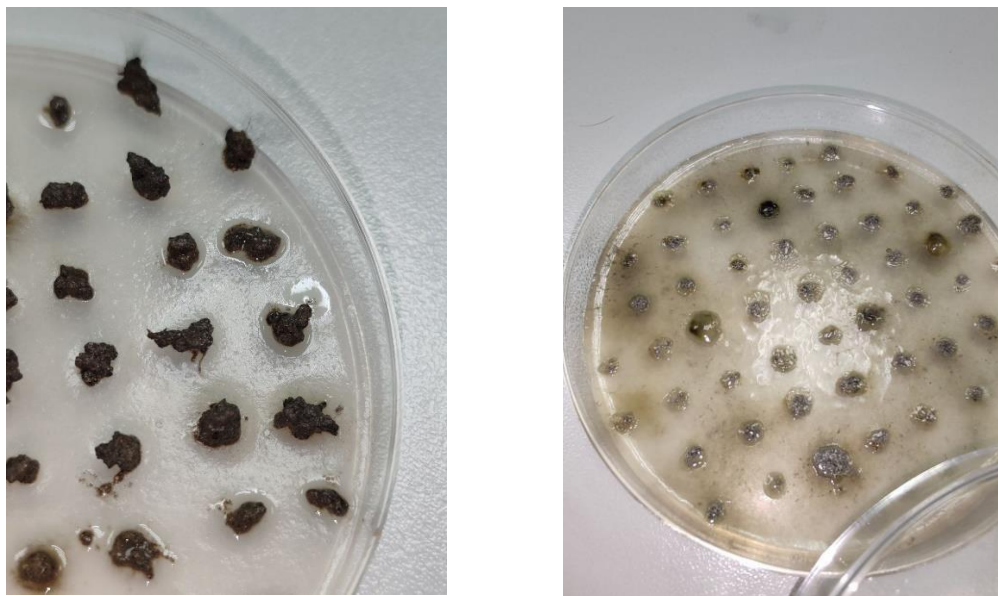


Рис. 9, 10 – Культивирование при температуре 24 градуса, наблюдения обрастаний почвенных комочков колониями бактерий, подсчет процента обросших комочков

## Скрининг изолятов на выработку ПГА



Рис. 11 – Выборка колоний бактерий для скрининга, присвоение им уникального номера, подготовленные предметные стекла, краситель, изопропанол



Рис. 12 – В каплю воды помещение мазков бактерий, сушка



Рис. 13 – Окрашивание мазков суданом черным, сушка, промывание изопропанолом

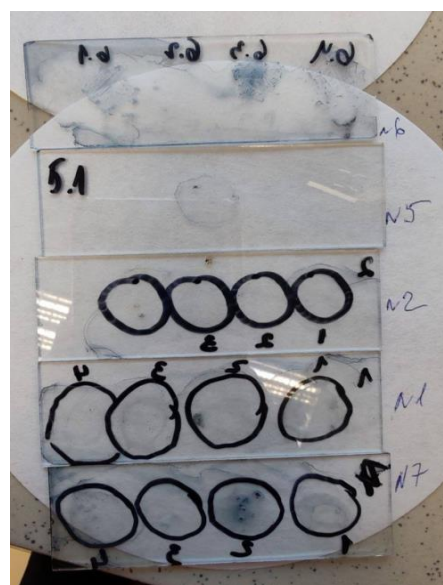


Рис.14 – Визуальная оценка интенсивности окраски

Таблица 2. Содержание химических соединений в золошлаках Рефтинской ГРЭС, масс. %

Наименование составляющих	% (усредненное значение)
Проценты прочих примесей (BaO, SrO, F, MnO)	1,9
SiO <sub>2</sub>	60,2
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	30,92
CaO	1,28
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,35
SO <sub>3</sub>	0,153
MgO	0,577
Na <sub>2</sub> O	0,525
K <sub>2</sub> O	0,750
TiO <sub>2</sub>	1,17
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,482
RuO <sub>2</sub>	0,219