

МРНТИ 68.05.43

УДК 631.453

<https://doi.org/10.52269/KGTD2531194>

### ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ НЕФТЕПРОДУКТОВ НА БИОЛОГИЧЕСКУЮ И ФЕРМЕНТАТИВНУЮ АКТИВНОСТЬ ПОЧВЫ

Оразалиева А.Н.\* – докторант PhD Алматинского университета энергетики и связи им. Г.Дукеева, главный научный сотрудник, Филиал РГП «Инфракос» в г. Алматы, Республика Казахстан.

Ермолдина Э.Т. – доктор PhD, филиал РГП «Инфракос» в г. Алматы, Республика Казахстан.

Степанова Е.Ю. – заместитель начальника экологического отдела Филиала РГП «Инфракос» в г. Алматы, Республика Казахстан.

Сайлығара А.А. – магистр, ведущий научный сотрудник, Филиал РГП «Инфракос» в г. Алматы, Республика Казахстан.

Сохранение и восстановление плодородия почв является одной из ключевых задач сельскохозяйственной науки, особенно в условиях возрастающей техногенной нагрузки. В районах, подверженных загрязнению углеводородными продуктами, в том числе компонентами ракетного топлива, происходят нарушения микробиологических процессов, определяющих устойчивость агроэкосистем. Оценка биологической и ферментативной активности почвы позволяет определить степень её деградации и перспективы дальнейшего использования в сельскохозяйственном производстве.

Целью исследования стало изучение влияния керосинов марок Т-1 и РГ-1 на микробное сообщество и ферментативную активность бурых почв, отобранных в зоне падения первой ступени РН «Союз». Задачи включали определение каталазной, протеазной, целлюлазной и дегидрогеназной активности микроорганизмов в динамике (на 1-й и 90-й день эксперимента), а также установление дозозависимого эффекта углеводородного загрязнения.

Методология работы основывалась на классических микробиологических и биохимических методах анализа почвы, включая *in vitro* тесты на ферментативную активность и спектрофотометрическое определение дегидрогеназ.

Результаты показали, что при концентрациях ракетного топлива выше 500 мг/кг наблюдается достоверное снижение численности почвенных микроорганизмов и биологической активности, что указывает на критический уровень токсичности для агроэкосистем. На 90-й день эксперимента сохраняется тенденция угнетения ферментативной активности, однако часть микробного сообщества демонстрирует устойчивость к загрязнению.

Практическая значимость работы заключается в возможности использования выявленных показателей для экологического нормирования, мониторинга состояния почв сельскохозяйственного назначения и прогнозирования последствий загрязнения для их продуктивности. Вклад исследования состоит в уточнении пороговых концентраций углеводородов, влияющих на почвенную биоту, что имеет важное значение для агроэкологии и рационального использования земель.

**Ключевые слова:** почва, нефтепродукты, углеводородное ракетное топливо, биологическая активность, ферментативная активность, микроорганизмы, дегидрогеназная активность.

### МҰНАЙ ӨНІМДЕРІНІҢ ТОПЫРАҚТЫҢ БИОЛОГИЯЛЫҚ ЖӘНЕ ФЕРМЕНТАТИВТІК БЕЛСЕНДІЛІГІНЕ ӨСЕРІН ЗЕРТТЕУ

Оразалиева А.Н.\* – PhD докторант *Ғ. Дукеев атындағы Алматы энергетика және байланыс университеті*, бас ғылыми қызметкер, "Инфракос" РМК-ның Алматы қаласындағы филиалы, Қазақстан Республикасы.

Ермолдина Э.Т. – PhD докторы, "Инфракос" РМК-ның Алматы қаласындағы филиалы, Қазақстан Республикасы.

Степанова Е.Ю. – экологиялық бөлімі бастығының орынбасары, "Инфракос" РМК-ның Алматы қаласындағы филиалы, Қазақстан Республикасы.

Сайлығара А.А. – магистр, жетекші ғылыми қызметкер, "Инфракос" РМК-ның Алматы қаласындағы филиалы, Қазақстан Республикасы.

Топырақтың құнарлылығын сақтау және қалпына келтіру ауыл шаруашылығы ғылымының, әсіресе өсіп келе жатқан техногендік жүктеме жағдайындағы негізгі міндеттерінің бірі болып табылады. Көмірсутек өнімдерімен, оның ішінде зымыран отыны компоненттерімен ластануға ұшыраған аудандарда агроэкосистемелердің тұрақтылығын айқындайтын микробиологиялық процестердің бұзылуы орын алады. Топырақтың биологиялық және ферментативтік белсенділігін бағалау оның тозу дәрежесін және ауыл шаруашылығы өндірісінде одан әрі пайдалану перспективаларын анықтауға мүмкіндік береді.

Зерттеудің мақсаты Т-1 және РГ-1 маркалы керосиндердің микробтық қоғамдастыққа және «Союз» ЗТ бірінші сатысының құлдырау аймағынан іріктелген қоңыр топырақтың ферментативтік белсенділігіне әсерін зерттеу болды. Міндеттер динамикадағы микроорганизмдердің каталазалық, протеазалық, целлюлозалық және дегидрогеназалық белсенділігін анықтауды (эксперименттің 1-ші және 90-шы күні), сондай-ақ көмірсутекті ластанудың дозаға тәуелді әсерін белгілеуді қамтыды.

Жұмыс әдіснамасы ферментативтік белсенділікке және дегидрогеназды спектрофотометриялық анықтауға *in vitro* тесттерді қоса алғанда, топырақты талдаудың классикалық микробиологиялық және биохимиялық әдістеріне негізделген.

Нәтижелер зымыран отынының 500 мг/кг жоғары шоғырлануы кезінде топырақты микроорганизмдер санының және биологиялық белсенділіктің анық төмендеуі байқалатынын көрсетті, бұл агроэкожүйелер үшін уыттылықтың шекті деңгейін көрсетеді. Эксперименттің 90-шы күнінде ферментативтік белсенділіктің қысым көрсету үрдісі сақталуда, алайда микробтық қоғамдастықтың бір бөлігі ластануға төзімділігін көрсетеді.

Жұмыстың практикалық маңыздылығы экологиялық нормалау, ауыл шаруашылығы мақсатындағы топырақтың жай-күйін мониторингілеу және олардың өнімділігі үшін ластану салдарларын болжау үшін анықталған көрсеткіштерді пайдалану мүмкіндігінен тұрады. Зерттеудің үлесі топырақ биотасына әсер ететін көмірсутектердің шекті шоғырлануын нақтылаудан тұрады, бұл агроэкология мен жерді ұтымды пайдалану үшін маңызды мәнге ие.

**Түйінді сөздер:** топырақ, мұнай өнімдері, көмірсутекті зымыран отыны, биологиялық белсенділік, ферментативтік белсенділік, микроорганизмдер, дегидрогеназды белсенділік.

#### RESEARCH ON PETROLEUM PRODUCTS EFFECT ON THE BIOLOGICAL AND ENZYMATIC ACTIVITY OF SOIL

Orazaliyeva A.N.\* – PhD student, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications named after G. Daukeyev, Chief Researcher, Almaty Branch of Infracos RSE, Almaty, Republic of Kazakhstan.

Yermoldina E.T. – PhD, Almaty Branch of Infracos, Almaty, Republic of Kazakhstan.

Stepanova Ye.Yu. – Deputy Head of the Environmental Department of the Almaty Branch of Infracos RSE, Almaty, Republic of Kazakhstan.

Sailygara A.A. – Master, Leading Researcher, Almaty Branch of Infracos RSE, Almaty, Republic of Kazakhstan.

Preserving and restoring soil fertility is one of the key tasks of agricultural science, especially under increasing anthropogenic pressure. In areas exposed to hydrocarbon pollution, including missile fuel, disturbances occur in microbiological processes that determine the stability of agroecosystems. Assessment of soil biological and enzymatic activity enables to determine the degree of its degradation and the prospects for agricultural use.

The research purpose was to investigate the effect of T-1 and RG-1 kerosene on the microbial community and enzymatic activity of brown soils collected in the impact zone of the Soyuz first-stage booster. The objectives included determining catalase, protease, cellulase, and dehydrogenase activity of microorganisms in dynamics (1st and 90th days of the experiment), as well as establishing the dose-dependent effect of hydrocarbon pollution.

The methodology was based on classical microbiological and biochemical approaches to soil analysis, including *in vitro* tests for enzymatic activity and spectrophotometric determination of dehydrogenases.

The results showed that at fuel concentrations above 500 mg/kg there was a marked decrease in soil microorganisms and biological activity, indicating a critical level of toxicity for agroecosystems. By the 90th day, the suppression of enzymatic activity persisted, although part of the microbial community demonstrated resistance to contamination.

The practical relevance of the study lies in the use of identified indicators for environmental standardization, monitoring of agricultural soils, and predicting the consequences of pollution for productivity. The study contribution is the clarification of threshold concentrations of hydrocarbons affecting soil biota, which is essential for agroecology and sustainable land use.

**Keywords:** soil, petroleum products, hydrocarbon missile fuel, biological activity, enzymatic activity, microorganisms, dehydrogenase activity.

**Введение.** Проблема загрязнения почв углеводородными соединениями, в частности нефтепродуктами и компонентами ракетного топлива, является одной из наиболее актуальных в экологии и сельскохозяйственных науках [1, с. 113; 2, с. 394].

Почва представляет собой сложную и высокоорганизованную систему, устойчивость и продуктивность которой во многом определяются активностью почвенной биоты. Любое внешнее техногенное воздействие, приводящее к изменению численности микроорганизмов и ферментативной активности, неизбежно сказывается на плодородии и экологическом состоянии земель [1, с. 102; 2, с. 395; 3, с. 210].

Особенно остро эта проблема проявляется в регионах, где размещены районы падения отделяющихся частей ракет-носителей. На территории Казахстана такие зоны охватывают обширные участки степных экосистем, включая Улытаускую и Северо-Казахстанскую области, что приводит к формированию очагов локального загрязнения углеводородами [3, с. 210; 4, с. 532].

Углеводородное ракетное топливо (УВГ) обладает высоким токсическим потенциалом по отношению к живым организмам. Попадая в почву, оно нарушает процессы минерализации органических веществ, изменяет соотношение основных групп микроорганизмов, подавляет деятельность ферментов и, как следствие, снижает способность почв к самовосстановлению. Результатом может стать деградация почвенных экосистем, утрата их агроэкологического потенциала и ограничение возможности использования таких земель в сельском хозяйстве.

Современные исследования показывают, что одним из наиболее информативных показателей состояния почвы является её ферментативная активность. Ферменты катализируют ключевые процессы разложения и трансформации органического вещества, а их уровень отражает как генетические особенности почвы, так и её текущее состояние под влиянием загрязнителей. Наиболее часто в почвоведении оцениваются каталазная, протеазная, целлюлазная и дегидрогеназная активности. Каталаза обеспечивает расщепление токсичной перекиси водорода и связана с численностью аэробных микроорганизмов. Протеазы и целлюлазы отвечают за разрушение белковых и целлюлозных соединений, обеспечивая поступление питательных элементов. Дегидрогеназы отражают метаболическую активность микробного сообщества в целом, так как они функционируют только в живых клетках.

Несмотря на значительное количество публикаций о влиянии нефтепродуктов на почвы, остаётся недостаточно изученным воздействие конкретных марок ракетного топлива – керосинов Т-1 и РГ-1, – на ферментативный профиль бурых почв Центрального Казахстана [6, с. 7, 7, с. 4]. Более того, в литературе недостаточно данных о динамике изменений активности ферментов при длительном воздействии УВГ, что существенно ограничивает возможности прогнозирования последствий для агроэкосистем.

**Цель исследования** – изучить воздействие керосинов Т-1 и РГ-1 на биологическую и ферментативную активность бурых почв, отобранных в районах падения боковых блоков первой ступени ракеты-носителя «Союз» в Казахстане. Для достижения цели исследования определены следующие задачи исследования:

- Определение каталазной, протеазной, целлюлазной и дегидрогеназной активности микроорганизмов в образцах почвы на 1-й и 90-й день эксперимента;
- Сравнение изменений ферментативной активности в зависимости от концентрации углеводородного загрязнения;
- Оценка дозозависимого эффекта влияния керосинов Т-1 и РГ-1 на почвенную биоту;
- Установление пороговой концентрации токсичности углеводородного ракетного топлива, влияющей на биологическую активность почвы.

**Материалы и методы.** Для оценки биологической и ферментативной активности использовались образцы бурых почв, отобранные в зоне падения боковых блоков ракеты-носителя «Союз». В качестве загрязнителей применялись углеводородные ракетные топлива марок Т-1 и РГ-1 в различных концентрациях. Объектами анализа служили микроорганизмы, выделенные из почвенных образцов на 1-й и 90-й день после внесения топлива.

В качестве диагностических показателей состояния почвы рассматривались:

- общая микробная обсемененность (ОМЧ), включающая аэробные и анаэробные микроорганизмы;
- активность гидролитических ферментов (протеазы, целлюлазы);
- активность окислительно-восстановительных ферментов (каталазы и дегидрогеназы).

Эти показатели позволяли судить о жизнеспособности почвенной микробиоты, её способности к поддержанию гомеостаза и о потенциальных изменениях в ферментативном профиле под воздействием углеводородного загрязнения.

Биологическая и ферментативная активность почв оценивалась по уровню микробной обсемененности и активности ферментов микроорганизмов, обитающих в почве. В качестве диагностических показателей рассматривались каталазная, протеазная, целлюлазная и дегидрогеназная активности.

Для анализа использовались микроорганизмы, выделенные из образцов бурых почв, подвергнутых загрязнению керосинами Т-1 и РГ-1. Оценка проводилась на 1-й и 90-й день эксперимента.

**Результаты.** Каталазная активность определялась *in vitro* на клеточных культурах выделенных изолятов микроорганизмов [8, с. 5, 9, с. 8-10]. В качестве субстрата применялся 3%-ный раствор перекиси водорода. Интенсивность реакции фиксировалась по газообразованию (выделение кислорода), возникающему при ферментативном распаде пероксида водорода до воды и молекулярного кислорода под действием каталаз.

Общая микробная обсемененность (ОМЧ) оценивалась с учётом аэробных и анаэробных микроорганизмов. При этом учитывалось, что синтез каталазы преимущественно осуществляется аэробными формами, численность которых может снижаться в глубинных горизонтах почвы вследствие уменьшения содержания кислорода.

Каталазная активность тестировалась у бактериальных и грибных изолятов, выделенных из контрольных и опытных образцов. Сравнительный анализ проводился для изолятов, полученных на 1-й и 90-й день после внесения ракетного топлива.

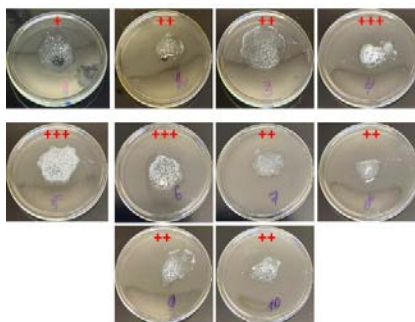
**Результаты и обсуждение.** Анализ микробного сообщества и ферментативной активности почв, подвергшихся воздействию углеводородного ракетного топлива, показал, что даже на 1-й и 90-й день после внесения топлива сохраняется часть жизнеспособных микроорганизмов. Однако с увеличением концентрации керосинов Т-1 и РГ-1 наблюдалась выраженная тенденция к снижению численности аэробных микроорганизмов и общей биологической активности почвы. Это указывает на прямую дозозависимую реакцию микробного сообщества на углеводородное загрязнение.

Полученные данные подтверждают сведения литературы о том, что нефтепродукты, в том числе компоненты ракетного топлива, оказывают ингибирующее действие на микробные сообщества, что проявляется как в снижении их численности, так и в угнетении ферментативных систем [10, с. 6, 11 с. 6]. При этом часть микроорганизмов сохраняла активность, что свидетельствует о наличии устойчивых форм, способных функционировать даже при повышенной нагрузке углеводородами. Результаты сведены в таблицу 1.

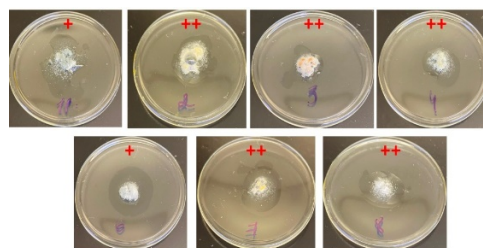
**Таблица 1** – Результаты качественной оценки каталазной активности изолятов на 1-й день эксперимента с загрязнением почвы керосинами Т-1 и РГ-1.

| №  | Каталазная активность (бактерии) | Каталазная активность (микробицеты) |
|----|----------------------------------|-------------------------------------|
| 1  | +                                | +                                   |
| 2  | ++                               | ++                                  |
| 3  | ++                               | ++                                  |
| 4  | +++                              | ++                                  |
| 5  | +++                              | +                                   |
| 6  | +++                              | ++                                  |
| 7  | ++                               | ++                                  |
| 8  | ++                               |                                     |
| 9  | ++                               |                                     |
| 10 | ++                               |                                     |

Примечание – «+» – слабое газообразование; «++» – хорошее газообразование; «+++» – сильное газообразование



**Рисунок 1** – Каталазная активность 10 изолятов бактерий на 1-й день эксперимента при загрязнении почвы керосинами Т-1 и РГ-1 (интенсивность газообразования отмечена знаком «+»).



**Рисунок 1.1** – Каталазная активность для 7-ми изолятов микромицетов (красным знаком «+» указана интенсивность газообразования) на 1-й день эксперимента с загрязнением почвы керосинами Т-1 и РГ-1

**Таблица 1.1** – Результаты качественной оценки каталазной активности у выделенных изолятов микроорганизмов на 90-й день эксперимента с загрязнением почвы керосинами Т-1 и РГ-1

| № | Каталазная активность (бактерии) | Каталазная активность (микробицеты) |
|---|----------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | ++                               | ++                                  |
| 2 | +++                              | +                                   |
| 3 | ++                               | +++                                 |
| 4 | +                                | +++                                 |
| 5 | ++                               | +                                   |
| 6 |                                  | +                                   |
| 7 |                                  | ++                                  |

Примечание – «+» – слабое газообразование; «++» – хорошее газообразование; «+++» – сильное газообразование

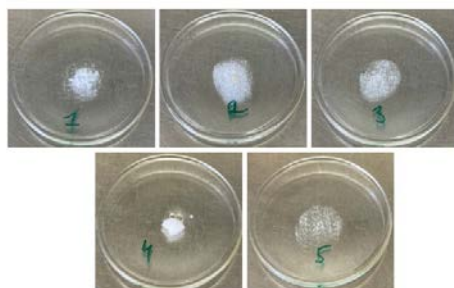


Рисунок 1.3 – Результаты качественной оценки каталазной активности для 5-ти изолятов бактерий на 90-й день эксперимента с загрязнением почвы керосинами Т-1 и РГ-1

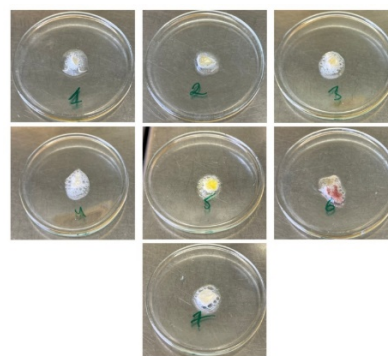


Рисунок 1.4 – Результаты качественной оценки каталазной активности для 7-ми изолятов микромицетов на 90-й день с загрязнением почвы Т-1 и РГ-1

Протеазы обеспечивают гидролиз белков и пептидов, что является важным процессом минерализации органического вещества в почве. На 1-й день эксперимента протеазная активность была зафиксирована у 9 из 10 бактериальных изолятов, хотя степень выраженности различалась. Наибольшие зоны гидролиза казеина наблюдались у изолятов № 4 и № 8 (18 мм), а также № 1 (14,3 мм) и № 7 (15 мм).

На 90-й день эксперимента протеазная активность сохранялась только у 2 бактериальных изолятов (№ 1 и № 2), тогда как у остальных зон гидролиза не отмечалось. Среди грибных изолятов протеазная активность была выявлена у культур № 1, 2, 5 и 7.

Динамика протеазной активности указывает на существенное угнетение гидролитического потенциала микробного сообщества в условиях длительного воздействия углеводов. Это согласуется с литературными данными о том, что протеазы являются более чувствительными к нефтепродуктам ферментами по сравнению, например, с каталазами.

Таблица 2 – Результаты качественной оценки протеазной активности изолятов на 1-й день эксперимента с загрязнением почвы керосинами Т-1 и РГ-1

| №  | Диаметр зоны гидролиза белка, мм<br>M±StD |
|----|-------------------------------------------|
| 1  | 14,3±0,58                                 |
| 2  | 9,3±0,58                                  |
| 3  | 8,0±0,00                                  |
| 4  | 18,0±0,00                                 |
| 5  | отсутствует                               |
| 6  | 8,7±1,15                                  |
| 7  | 15,0±0,00                                 |
| 8  | 18,0±0,00                                 |
| 9  | 7,0±1,00                                  |
| 10 | 11,7±0,58                                 |

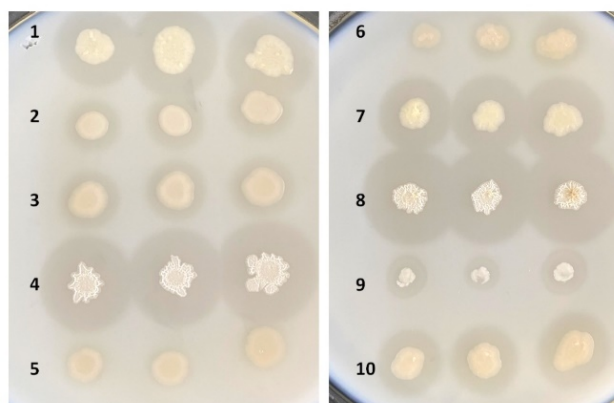


Рисунок 2 – Протеазная активность для 10-ти изолятов бактерий (номера 1-10 – порядковые номера изолятов; светлые зоны вокруг колоний – зоны гидролиза казеина) на 1-й день эксперимента с загрязнением почвы Т-1 и РГ-1

Таблица 2.1 – Результаты качественной оценки протеазной активности у выделенных изолятов микроорганизмов на 90-й день эксперимента с загрязнением почвы керосинами Т-1 и РГ-1

| № | Диаметр зоны гидролиза белка, мм<br>M±StD (бактерии) | Диаметр зоны гидролиза белка, мм<br>M±StD (микромикеты) |
|---|------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|
| 1 | 18,00±0,00                                           | 12,67±0,58                                              |
| 2 | 10,67±0,58                                           | 19,67±0,58                                              |
| 3 | отсутствует                                          | отсутствует                                             |
| 4 | отсутствует                                          | отсутствует                                             |
| 5 | отсутствует                                          | 16,67±0,58                                              |
| 6 |                                                      | отсутствует                                             |
| 7 |                                                      | 16,67±0,58                                              |

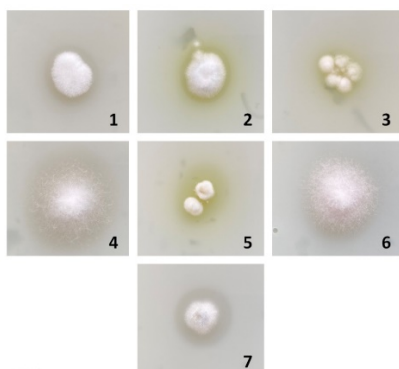


Рисунок 2.1 – Протеазная активность 7 изолятов микроскопических грибов (№1–7) на 90-й день эксперимента при загрязнении почвы керосинами Т-1 и РГ-1 (светлые зоны – гидролиз казеина)

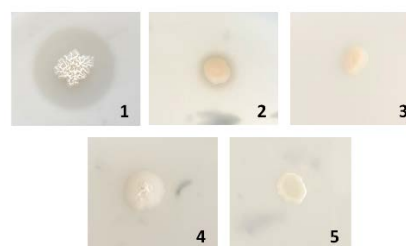


Рисунок 2.2 – Протеазная активность 5 изолятов бактерий (№1–5) на 90-й день эксперимента при загрязнении почвы керосинами Т-1 и РГ-1 (светлые зоны вокруг колоний – гидролиз казеина)

Целлюлазная активность отражает способность почвенной биоты разрушать растительные остатки и является важным показателем круговорота углерода. На 1-й день эксперимента активность целлюлазы была обнаружена у всех 10 бактериальных изолятов, хотя диаметр зон гидролиза варьировал. Наибольшие показатели зарегистрированы у изолятов № 4 (9,3 мм), № 7 (8,7 мм) и № 8 (11,3 мм).

К 90-му дню целлюлазная активность сохранялась у всех 5 бактериальных и 7 грибных изолятов. Особенно высокие значения зафиксированы у грибов № 4, 6 и 7 (до 24,7 мм). Это свидетельствует о том, что грибная микрофлора играет более значимую роль в разложении целлюлозы в условиях углеводородного загрязнения.

В отличие от протеаз, целлюлазная активность демонстрирует большую устойчивость к присутствию углеводов. Вероятно, это связано с тем, что грибы обладают более широким спектром ферментов, участвующих в деградации полисахаридов.

Таблица 3 – Результаты качественной оценки целлюлазной активности изолятов на 1-й день эксперимента с загрязнением почвы Т-1 и РГ-1

| №  | Диаметр зоны гидролиза белка, мм<br>M±StD |
|----|-------------------------------------------|
| 1  | 7,3±4,62                                  |
| 2  | 2,0±0,00                                  |
| 3  | 2,0±0,00                                  |
| 4  | 9,3±1,15                                  |
| 5  | 2,0±0,00                                  |
| 6  | 2,0±0,00                                  |
| 7  | 8,7±1,15                                  |
| 8  | 11,3±1,15                                 |
| 9  | 2,0±0,00                                  |
| 10 | 2,0±0,00                                  |

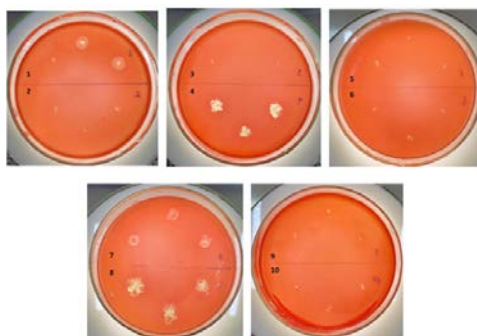


Рисунок 3 – Результаты качественной оценки целлюлазной активности для 10-ти изолятов бактерий (номера 1-10 – порядковые номера изолятов; светлые зоны – зоны гидролиза целлюлозы) на 1-й день эксперимента с загрязнением почвы керосинами Т-1 и РГ-1

Таблица 3.1 – Результаты качественной оценки целлюлазной активности у выделенных изолятов микроорганизмов на 90-й день эксперимента с загрязнением почвы Т-1 и РГ-1

| № | Диаметр зоны гидролиза целлюлозы, мм<br>M±StD (Бактерии) | Диаметр зоны гидролиза целлюлозы, мм<br>M±StD (Микромицеты) |
|---|----------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| 1 | 9,33±1,15                                                | 11,67±0,58                                                  |
| 2 | 6,33±0,58                                                | 11,33±0,58                                                  |
| 3 | 5,67±0,58                                                | 12,00±0,00                                                  |
| 4 | 4,67±0,58                                                | 24,67±0,58                                                  |
| 5 | 1,33±0,58                                                | 11,00±0,00                                                  |
| 6 |                                                          | 24,33±0,58                                                  |
| 7 |                                                          | 16,67±0,58                                                  |

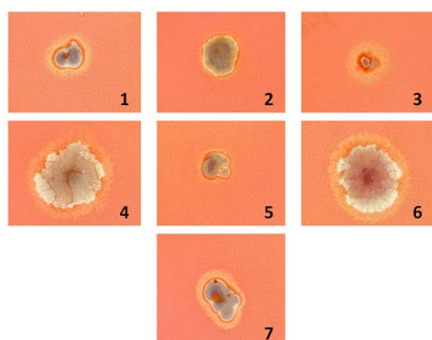


Рисунок 3.1 – Целлюлазная активность 7 изолятов микромицетов (№1–7) на 90-й день эксперимента при загрязнении почвы керосинами Т-1 и РГ-1 (светлые зоны – гидролиз целлюлозы)

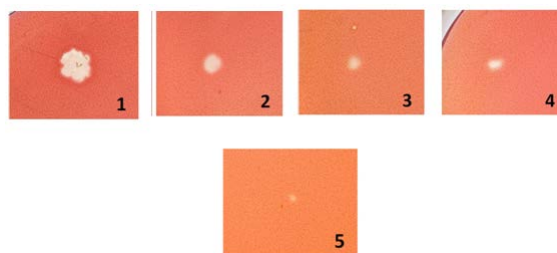


Рисунок 3.2 – Целлюлазная активность 5 изолятов бактерий (№1–5) на 90-й день эксперимента при загрязнении почвы керосинами Т-1 и РГ-1 (светлые зоны – гидролиз целлюлозы)

Дегидрогеназные ферменты отражают интенсивность метаболизма микробного сообщества и считаются одним из наиболее надёжных индикаторов биологической активности почвы [8, с. 11, 9, с. 10]. Их специфическая особенность заключается в том, что они функционируют только в живых клетках, а потому напрямую показывают уровень жизнеспособности микробиоты.

На 1-й день эксперимента максимальные значения дегидрогеназной активности были зафиксированы в контрольных образцах (158,9 мг формазана/кг), что соответствует нормальной метаболической активности почвенной микрофлоры. При внесении керосинов Т-1 и РГ-1 наблюдалось дозозависимое снижение показателей: минимальные значения составили 80,1 мг формазана/кг (Т-1, 14 925 мг/кг) и 70,6 мг формазана/кг (РГ-1, 4325 мг/кг). Это свидетельствует о выраженном токсическом эффекте углеводородов, подавляющих активность почвенных микроорганизмов.

К 90-му дню эксперимента снижение дегидрогеназной активности сохранялось. Даже в вариантах с меньшими концентрациями топлива показатели оставались ниже контрольных значений. В образцах с максимальными дозами РГ-1 и Т-1 ферментативная активность составляла лишь 68,7–87,3 мг формазана/кг, что указывает на устойчивое угнетение микробной метаболической активности.

Статистическая обработка данных подтвердила достоверную корреляцию между ростом концентрации топлива и падением активности ферментов ( $p < 0,0001$ ). Однако сравнение результатов 1-го

и 90-го дня показало отсутствие достоверных различий ( $p=0,2221$ ), что говорит о том, что метаболический потенциал микробного сообщества остаётся подавленным на протяжении всего периода наблюдений, без признаков восстановления.

Эти результаты согласуются с литературными данными, где дегидрогеназы рассматриваются как наиболее чувствительные биомаркеры токсичности почв. Их угнетение при внесении углеводов свидетельствует о снижении способности почвы к разложению органических веществ и замедлении основных биогеохимических циклов. В условиях сельского хозяйства это напрямую отражается на снижении плодородия, так как уменьшается интенсивность процессов минерализации и мобилизации элементов питания.

**Таблица 4** – Результаты оценки дегидрогеназной активности образцов почв на 1-й день эксперимента с загрязнением почвы керосинами Т-1 и РГ-1

| №        | Содержание компонентов ракетного топлива, мг/кг | Количество восстановленного формазана, мг/л | Показатель дегидрогеназной активности, мг формазана/кг почвы |
|----------|-------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
| Контроль | 1,08                                            | 17,7                                        | 158,9                                                        |
| Т-1-1    | 108,5                                           | 14,8                                        | 133,3                                                        |
| Т-1-2    | 587,5                                           | 13,1                                        | 118,1                                                        |
| Т-1-3    | 1087,5                                          | 12,8                                        | 115,0                                                        |
| Т-1-4    | 4625,0                                          | 12,7                                        | 114,2                                                        |
| Т-1-5    | 14925,0                                         | 8,9                                         | 80,1                                                         |
| РГ-1-1   | 84,75                                           | 15,1                                        | 135,7                                                        |
| РГ-1-2   | 600,0                                           | 12,3                                        | 111,1                                                        |
| РГ-1-3   | 895,0                                           | 11,7                                        | 105,5                                                        |
| РГ-1-4   | 4325,0                                          | 7,8                                         | 70,6                                                         |
| РГ-1-5   | 5800,0                                          | 8,1                                         | 72,9                                                         |



**Рисунок 4** – Результаты оценки дегидрогеназной активности образцов почв на 1-й день эксперимента с загрязнением почвы керосинами Т-1 и РГ-1

**Таблица 4.1** – Результаты оценки дегидрогеназной активности образцов почв на 90-й день эксперимента с загрязнением почвы керосинами Т-1 и РГ-1

| Наименование образца | Содержание ракетного топлива, мг/кг | 1-й день исследований                       |                                                              | 90-й день исследований                      |                                                              |
|----------------------|-------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|
|                      |                                     | количество восстановленного формазана, мг/л | показатель дегидрогеназной активности, мг формазана/кг почвы | количество восстановленного формазана, мг/л | показатель дегидрогеназной активности, мг формазана/кг почвы |
| Контроль             | 1,08                                | 17,7                                        | 158,9                                                        | 16,8                                        | 151,6                                                        |
| РГ -1-1              | 84,75                               | 15,1                                        | 135,7                                                        | 12,7                                        | 114,4                                                        |
| РГ -1-2              | 600,0                               | 12,3                                        | 111,1                                                        | 12,2                                        | 110,1                                                        |

Продолжение таблицы 4.1

|         |         |      |       |      |       |
|---------|---------|------|-------|------|-------|
| РГ -1-3 | 895,0   | 11,7 | 105,5 | 10,9 | 97,9  |
| РГ -1-4 | 4325,0  | 7,8  | 70,6  | 7,6  | 68,8  |
| РГ -1-5 | 5800,0  | 8,1  | 72,9  | 7,6  | 68,7  |
| Т-1-1   | 108,5   | 14,8 | 133,3 | 14,7 | 132,5 |
| Т-1-2   | 587,5   | 13,1 | 118,1 | 13,8 | 124,6 |
| Т-1-3   | 1087,5  | 12,8 | 115,0 | 13,0 | 116,9 |
| Т-1-4   | 4625,0  | 12,7 | 114,2 | 12,1 | 108,9 |
| Т-1-5   | 14925,0 | 8,9  | 80,1  | 9,7  | 87,3  |

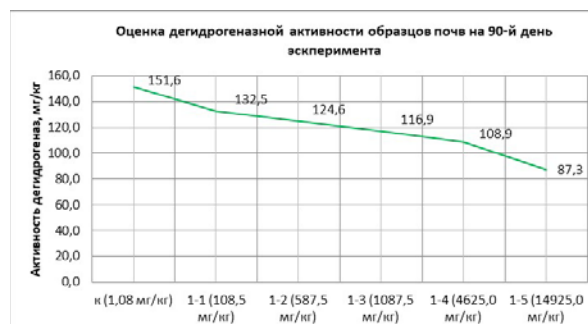


Рисунок 4.1 – Результаты оценки дегидрогеназной активности образцов почв на 90-й день эксперимента для образцов почв Т-1-1 – Т-1-5



Рисунок 4.2 – Результаты оценки дегидрогеназной активности образцов почв на 90-й день эксперимента для образцов почв РГ-1-1 – РГ-1-5

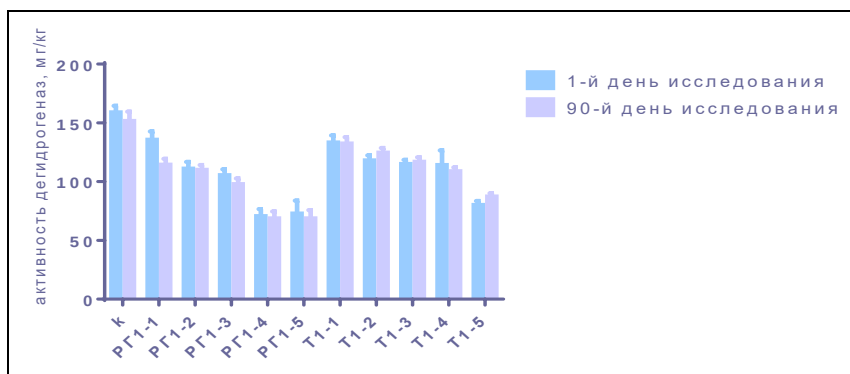


Рисунок 4.4 – Результаты сравнительной оценки дегидрогеназной активности образцов почв на 1-й и 90-й дни эксперимента

**Обсуждение.** Анализ полученных данных показал, что углеводородное загрязнение оказывает комплексное и разнонаправленное влияние на микробные сообщества бурых почв Центрального Казахстана. Уже на ранних этапах эксперимента (1-й день) наблюдалось снижение численности аэробных микроорганизмов, что сопровождалось падением каталазной активности. Учитывая, что большинство выделенных культур являлись каталазоположительными, уменьшение их численности напрямую отражается на снижении суммарной ферментативной активности почвы. Этот факт указывает на тесную зависимость между структурными изменениями микробиоценоза и функциональными параметрами почвенной системы [12, с. 12].

Протеазная активность проявлялась у подавляющего большинства бактериальных изолятов, однако её уровень снижался с ростом концентрации топлива и увеличением продолжительности эксперимента. Это показывает, что процессы белкового обмена наиболее чувствительны к воздействию углеводородов [13, с. 7]. В отличие от этого целлюлозолитическая активность сохранялась у всех изолятов, что подтверждает относительную устойчивость целлюлозоразрушающих микроорганизмов и важную роль грибов в обеспечении стабильности разложения растительных остатков даже при стрессовых условиях.

Дегидрогеназная активность оказалась наиболее информативным показателем общего метаболического состояния почвы. Установлено, что её уровень снижается пропорционально росту концентрации углеводородного топлива, что подтверждается статистически высокой значимостью ( $p < 0,0001$ ). При этом на протяжении всего эксперимента (90 дней) не зафиксировано достоверного восстановления

показателей ( $p=0,2221$ ). Это позволяет говорить о стойком и длительном ингибирующем эффекте углеводородного загрязнения на микробиоту.

Сравнение действия керосинов Т-1 и РГ-1 показало сходный характер токсичности, однако воздействие РГ-1 оказалось несколько более выраженным. Вероятно, это связано с различиями в химическом составе топлива и скоростью деградации его компонентов в почве.

**Закключение.** Проведённое исследование влияния углеводородных ракетных топлив на бурые почвы Центрального Казахстана позволило выявить основные закономерности изменения микробных сообществ и их ферментативной активности.

Установлено, что даже при сохранении отдельных функциональных возможностей микробного сообщества, общее снижение численности микроорганизмов и угнетение ферментативных систем указывают на выраженный токсический эффект. Наиболее чувствительными показателями воздействия оказались протеазная и дегидрогеназная активности, тогда как каталазы и целлюлазы продемонстрировали относительную устойчивость.

Статистически достоверное ( $p<0,0001$ ) снижение дегидрогеназной активности при концентрациях топлива выше 500 мг/кг позволяет рассматривать этот показатель в качестве интегрального биоиндикатора токсичности. Определённая пороговая нагрузка (500 мг/кг) может быть использована в качестве критерия по общесанитарному показателю вредности для нормирования содержания углеводородов в почве [8, с. 14, 11, с. 7].

#### **Информация о финансировании**

Исследования проведены при поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан в рамках гранта № AP19679969 «Исследование процессов идентификации ракетного углеводородного топлива в почвах районов эксплуатации ракет-носителей и разработка их гигиенического норматива», послужат основой разработке гигиенического норматива.

#### **ЛИТЕРАТУРА:**

1. Alef K., Nannipieri P. *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry* [Text] / K. Alef, P. Nannipieri. – London: Academic Press, 1995. – 576 с.
2. Anderson J.P.E., Domsch K.H. The metabolic quotient for CO<sub>2</sub> (qCO<sub>2</sub>) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions on microbial biomass [Text] / J.P.E. Anderson, K.H. Domsch // *Soil Biology and Biochemistry*. – 1993. – Vol. 25. – № 3. – P. 393-395.
3. Atlas R.M. *Petroleum Microbiology* [Text] / R.M. Atlas. – New York: Macmillan, 1984. – 692 с.
4. Геннадиев А.Н., Пиковский Ю.И., Ковач Р.Г., Шевченко В.В. Углеводородный статус почв разного возраста нефтяного загрязнения [Текст] / А.Н. Геннадиев, Ю.И. Пиковский, Р.Г. Ковач, В.В. Шевченко // *Почвоведение*. – 2016. – Т. 49. – № 5. – С. 529-537.
5. Исаева А., Успабаева А., Бишимбаев В., Исаев Е., Сатарова А. Биоремедиация нефтезагрязнённых почв Южного Казахстана [Текст] / А. Исаева, А. Успабаева, В. Бишимбаев, Е. Исаев, А. Сатарова // *Modern Applied Science*. – 2015. – Т. 9. – № 6. – С. 97-104.
6. Bekeshev Y., Semenov I., Stepanova Y., et al. Data on the temporal changes in soil properties at the emergency crash site of the launch vehicle 'Soyuz-FG' in Kazakhstan [Text] / Y. Bekeshev, I. Semenov, Y. Stepanova, et al. // *Data in Brief*. – 2024. – Vol. 55. – Article 110646. – 12 p.
7. Бекешев Е., Жумабекова Ж., Молдабеков М. Детоксикация почв, загрязнённых углеводородным ракетным топливом, методом биоремедиации [Текст] / Е. Бекешев, Ж. Жумабекова, М. Молдабеков // *Journal of Space Safety Engineering*. – 2024. – Т. 4. – С. 605-613.
8. Jia W., Cheng L., Tan Q., et al. Response of the soil microbial community to petroleum hydrocarbon stress shows a threshold effect [Text] / W. Jia, L. Cheng, Q. Tan, et al. // *Frontiers in Microbiology*. – 2023. – Vol. 14. – Article 1188229. – 15 p.
9. Moradi S., Sarikhani M.R., Ale-Agha A.B., et al. Effects of natural and prolonged crude oil pollution on soil enzyme activities [Text] / S. Moradi, M.R. Sarikhani, A.B. Ale-Agha, et al. // *Geoderma Regional*. – 2024. – Vol. 36. – e00742. – 12 p.
10. Li J., Xu Y., Song Q., et al. Structural and functional perturbations of microbial communities in historically petroleum-contaminated soils [Text] / J. Li, Y. Xu, Q. Song, et al. // *Environmental Science and Pollution Research*. – 2021. – Vol. 28. – P. 10589-10602.
11. Wang X., Guan X., Zhang X., et al. Microbial communities in petroleum-contaminated seasonally frozen soil and their response to temperature changes [Text] / X. Wang, X. Guan, X. Zhang, et al. // *Chemosphere*. – 2020. – Vol. 258. – Article 127375. – 10 p.
12. Ławniczak Ł., Woźniak-Karczewska M., Loibner A.P., Heipieper H.J., Chrzanowski Ł. Microbial degradation of hydrocarbons—basic principles for bioremediation: A review [Text] / Ł. Ławniczak, M. Woźniak-Karczewska, A.P. Loibner, H.J. Heipieper, Ł. Chrzanowski // *Molecules*. – 2020. – Vol. 25. – № 4. – 856. – 18 p.
13. Lee S.-H., Kim M.-S., Kim J.-G., Kim S.-O. Use of soil enzymes as indicators for contaminated soil monitoring [Text] / S.-H. Lee, M.-S. Kim, J.-G. Kim, S.-O. Kim // *Sustainability*. – 2020. – Vol. 12. – № 19. – 8209. – 15 p.

## REFERENCES:

1. Alef K., Nannipieri P. *Methods in Applied Soil Microbiology and Biochemistry*. London, Academic Press, 1995, 576 p.
2. Anderson J.P.E., Domsch K.H. The metabolic quotient for CO<sub>2</sub> (qCO<sub>2</sub>) as a specific activity parameter to assess the effects of environmental conditions on microbial biomass. *Soil Biology and Biochemistry*, 1993, vol. 25, no. 3, pp. 393-395.
3. Atlas R.M. *Petroleum Microbiology*. New York, Macmillan, 1984, 692 p.
4. Gennadiev A.N., Pikovskij Yu.I., Kovach R.G., Shevchenko V.V. Uglevodorodny'j status pochv raznogo vozrasta neftyanogo zagryazneniya [Hydrocarbon profile of soils at different stages of oil contamination]. *Pochvovedenie*, 2016, vol. 49, no. 5, pp. 529-537. (In Russian)
5. Isaeva A., Uspabaeva A., Bishimbaev V., Isaev E., Satarova A. Bioremediaciya neftezagryaznenny'h pochv Yuzhnogo Kazakhstana [Bioremediation of oil-contaminated soils in Southern Kazakhstan]. *Modern Applied Science*, 2015, vol. 9, no. 6, pp. 97-104. (In Russian)
6. Bekeshev Y., Semenov I., Stepanova Y., et al. Data on the temporal changes in soil properties at the emergency crash site of the launch vehicle 'Soyuz-FG' in Kazakhstan. *Data in Brief*, 2024, vol. 55, art. 110646.
7. Bekeshev Y., Zhumabekova Zh., Moldabekov M. Detoxification of contaminated soils from hydrocarbon rocket fuel used in «Soyuz» launch vehicles using the bioremediation method. *Journal of Space Safety Engineering*, 2024, vol. 4, pp. 605-613.
8. Jia W., Cheng L., Tan Q., et al. Response of the soil microbial community to petroleum hydrocarbon stress shows a threshold effect. *Frontiers in Microbiology*, 2023, vol. 14, art. 1188229.
9. Moradi S., Sarikhani M.R., Ale-Agha A.B., et al. Effects of natural and prolonged crude oil pollution on soil enzyme activities. *Geoderma Regional*, 2024, vol. 36, art. e00742.
10. Li J., Xu Y., Song Q., et al. Structural and functional perturbations of microbial communities in historically petroleum-contaminated soils. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021, vol. 28, pp. 10589-10602.
11. Wang X., Guan X., Zhang X., et al. Microbial communities in petroleum-contaminated seasonally frozen soil and their response to temperature changes. *Chemosphere*, 2020, vol. 258, art. 127375.
12. Ławniczak Ł., Woźniak-Karczewska M., Loibner A.P., Heipieper H.J., Chrzanowski Ł. Microbial degradation of hydrocarbons–basic principles for bioremediation: A review. *Molecules*, 2020, vol. 25, no. 4, art. 856.
13. Lee S.-H., Kim M.-S., Kim J.-G., Kim S.-O. Use of soil enzymes as indicators for contaminated soil monitoring. *Sustainability*, 2020, vol. 12, no. 19, art. 8209.

## Сведения об авторах:

Оразалиева Арай Назарбайқызы\* – докторант PhD кафедры космической инженерии, НАО «Алматинский университет энергетики и связи», главный научный сотрудник филиала РГП «Инфракос», Республика Казахстан, 050046, г. Алматы, ул. Абая 191, тел.: 87006649097, e-mail: orazaliyevaaray@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5480-4835>.

Ермолдина Эльмира Тлеубаевна – доктор PhD, филиал РГП «Инфракос», Республика Казахстан, 050046, г. Алматы, ул. Абая 191, тел.: 87772991582, e-mail: ermoldina@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8567-1342>.

Степанова Елена Юрьевна – заместитель начальника экологического отдела филиала РГП «Инфракос», Республика Казахстан, 050046, г. Алматы, ул. Абая 191, тел.: 87789313989, e-mail: s.ell@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9983-5857>.

Сайлығара Айсұлу Алтынбекқызы – магистр, ведущий научный сотрудник филиала РГП «Инфракос», Республика Казахстан, 050046, г. Алматы, ул. Абая 191, тел.: 87477942126, e-mail: aisulusin@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4245-142X>.

Оразалиева Арай Назарбайқызы\* – PhD докторант, ғарыштық инженерия кафедрасы, «Алматы энергетика және байланыс университети» КЕАҚ, РГП «Инфракос» филиалының бас ғылыми қызметкері, Қазақстан Республикасы, 050046, Алматы қ., Абай көш, 191, тел.: 87006649097, e-mail: orazaliyevaaray@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5480-4835>.

Ермолдина Эльмира Тлеубаевна – PhD докторы, РГП «Инфракос» филиалы, Қазақстан Республикасы, 050046, Алматы қ., Абай көш, 191, тел.: 87772991582, e-mail: ermoldina@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8567-1342>.

Степанова Елена Юрьевна – РГП «Инфракос» филиалы экология бөлімінің басшы орынбасары, Қазақстан Республикасы, 050046, Алматы қ., Абай көш, 191, тел.: 8778931398-9, e-mail: s.ell@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9983-5857>.

Сайлығара Айсұлу Алтынбекқызы – магистр, РГП «Инфракос» филиалының жетекші ғылыми қызметкері, Қазақстан Республикасы, 050046, Алматы қ., Абай көш, 191, тел.: 8747794212-6, e-mail: aisulusin@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4245-142X>.

Orazaliyeva Aray Nazarbaykyzy\* – PhD student, Department of space engineering, Almaty University of Power Engineering and Telecommunications, Chief Researcher of the Almaty Branch of Infracos RSE, Republic of Kazakhstan, 050046, Almaty, 191 Abai Str., tel.: 87006649097, e-mail: orazaliyevaaray@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5480-4835>.

Yermoldina Elmira Tleubayevna – PhD, Almaty Branch of Infracos RSE, Republic of Kazakhstan, 050046, Almaty, 191 Abai Str., tel.: 87772991582, e-mail: ermoldina@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8567-1342>.

Stepanova Yelena Yuriyevna – Deputy Head of the Environmental Department, Almaty Branch of Infracos RSE, Republic of Kazakhstan, 050046, Almaty, 191 Abai Str., tel.: 87789313989, e-mail: s.ell@mail.ru; ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9983-5857>.

Sailygara Aissulu Altynbekkyzy – Master, Leading Researcher, Almaty Branch of Infracos RSE, Republic of Kazakhstan, 050046, Almaty, 191 Abai Str., tel.: 87477942126, e-mail: aisulusin@gmail.com; ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-4245-142X>.

МРНТИ 68.01.94:68.29.01

УДК 631.95

<https://doi.org/10.52269/KGTD2531205>

### ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ МИКРОЗОНИРОВАНИЕ АГРОЛАНДШАФТОВ В УСЛОВИЯХ ТОО «ПОБЕДА» ПАВЛОДАРСКОЙ ОБЛАСТИ

Оспанова А.А.\* – докторант кафедры землеустройства, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина», г. Астана, Республика Казахстан.

Озеранская Н.Л. – кандидат экономических наук, доцент кафедры землеустройства, НАО «Казахский агротехнический исследовательский университет им. С. Сейфуллина», г. Астана, Республика Казахстан.

Мерзляков О.Э. – кандидат биологических наук, доцент кафедры почвоведения и экология почв, ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский государственный университет», г. Томск, Российская Федерация.

Целью данного исследования является разработка системы микрозонирования на основе эколого-ландшафтного подхода для организации эффективной охраны и рационального использования сельскохозяйственных угодий в проектных и прогнозных документах. В порядке исследования применялся комплексный анализ ландшафтной структуры землепользования; проведено изучение экологического состояния почвенного покрова с использованием геоинформационных технологий и на основе полевых исследований. В результате исследования на примере объекта сухостепной зоны Северного Казахстана выявлены закономерности деградации почв в зависимости от ландшафтных особенностей территории и интенсивности сельскохозяйственного использования. На основе выявленных зависимостей разработана система эколого-ландшафтного микрозонирования, обеспечивающая дифференцированный подход к планированию землепользования и охране почв в региональных условиях. Значимость полученных результатов заключается в возможности предотвращения деградационных процессов, сохранения и восстановления плодородия почв без снижения экономической эффективности сельскохозяйственного производства. Разработанная система эколого-ландшафтного микрозонирования агрохозяйственных землепользований применима для территорий с различными эколого-ландшафтными условиями и может быть интегрирована в действующие системы земледелия. Особенностью разработанной методики является детальный учет ландшафтной структуры местности, основанный на выделении морфологических единиц и учет экологических региональных особенностей территории. Детализированный подход к выделению однородных эколого-ландшафтных структур повышает эффективность разработанных мероприятий по сохранению почвенного плодородия при организации использования земель агроформирований.

**Ключевые слова:** сельскохозяйственные угодья, охрана земель, деградация почв, устойчивое землепользование, рациональное использование земли, экологическое микрозонирования агроландшафтов.