

УДК 574.6:477.63/64

С.З. Зайнудинов, Ф.С. Комилов, С.Х. Мирзоев, Ф. Акобирзода

**РАЗРАБОТКА КОНЦЕПТУАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ЭКОСИСТЕМЫ
РЫБОВОДНОГО ПРУДА И ЕЁ ИССЛЕДОВАНИЕ
НА КАЧЕСТВЕННУЮ УСТОЙЧИВОСТЬ**

Аннотация: статья посвящена разработке концептуального моделирования экосистемы рыбоводного пруда и её проверке на качественную устойчивость. Выбор переменных модели производится в зависимости от подбора видового состава рыб, поставленных целей и задач исследования.

Ключевые слова: модель, концептуальное моделирование, экосистема, рыбоводный пруд, устойчивость, концентрация, белый толстолобик, карп.

S.Z. Zaynudinov, F.S. Komilov, S.H. Mirzoev, F. Akobirzoda

**DEVELOPMENT OF A FISHPOND ECOSYSTEM'S CONCEPTUAL
MODEL AND ITS QUALITY STABILITY RESEARCH**

Abstract: the article is devoted to the development of a fishpond ecosystem's conceptual model and its quality stability verification. The choice of variables in the model is made according to the selection of fish species, goals and objectives of the research.

Keywords: model, conceptual modeling, ecosystem, fishpond, sustainability, concentration, white silver carp, carp.

Самым важным предназначением любой модели считается её применимость для изучения и прогнозирования поведения той системы, для которой она и построена. Модель позволяет имитировать исходную систему, включая или отключая те или иные связи, менять их местами, чтобы понять важность этих связей в поведении системы в целом. Путем апробирования различных вариантов функционирования системы модель позволяет научиться управлять этой системой.

Под *концептуальной моделью* понимают содержательное описание моделируемого объекта, которое базируется на определённой концепции или точке зрения модельера. Концептуальная модель всегда предшествует созданию формальной (математической или компьютерной) модели.

При разработке любой концептуальной модели возникает вопрос выбора переменных. Например, одной из основных характеристик любого водного объекта является его первичная продуктивность, т. е. биомасса водорослей. Поэтому в качестве первой переменной его концептуальной модели необходимо выбрать концентрацию фитопланктона [1].

Развитие фитопланктона, помимо экзогенных, климатических факторов, может лимитироваться концентрацией питательных веществ. А лимитирующими биогенными элементами в водоёмах, как правило, выступают углерод, азот и фосфор. Следовательно, в качестве следующих переменных модели могут быть выбраны концентрации этих элементов.

Если рассматривать трансформацию вещества по трофической цепи, то в агрегированном виде имеет смысл учесть концентрацию консументов. Значит, следующими переменными модели будут концентрации рыбы, зоопланктона, бентоса и т. д.

Круговорот веществ в экосистеме замыкается через отмершую органику (детрита), которая вновь разлагается до биогенных элементов под действием бактерий. Поэтому концентрации детрита и бактерий могут выступать в качестве последующих переменных концептуальной модели водной экосистемы.

Концептуальная модель экосистемы рыбоводного пруда. Под концептуальной моделью экосистемы рыбоводного пруда мы подразумеваем систематизированное содержательное описание моделируемой экосистемы на языке блок-схемы. Она полагается на описании биогидрохимических круговоротов веществ, изменении биотических и химических элементов, призвана для детального описания её компонентов, а также трофических, управляющих и информационных связей между ними.

Схема концептуальной модели, в которой учтены вышеизложенные доводы, отражена на рис. 1. В схеме представлены только два вида рыб – карп (*CR*) и белый толстолобик (*TL*), хотя другие виды – пестрый толстолобик, белый амур и буффало – в определенной степени влияют на протекающие в пруду биологические процессы, но не в такой мере, чтобы существенным образом могли бы что-то изменить. Среди общего числа карпа и белого толстолобика их численность, как обычно, бывает сравнительно невелика, поэтому они агрегированы в вышеуказанные виды.

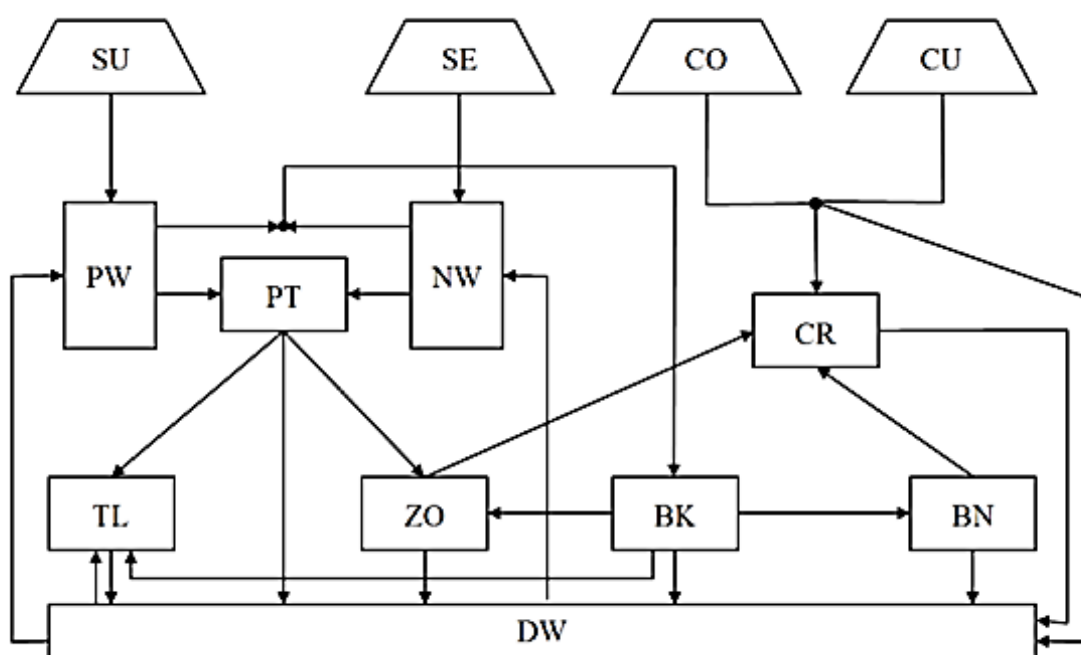


Рис. 1. Концептуальная модель экосистемы рыбоводного пруда

Для правильной оценки рыбохозяйственных возможностей пруда требуется подробное описание как рациона рыб, так и трофических взаимодействий между видами рыб и остальными компонентами экосистемы. Для описания других процессов, происходящих в водоёме, требуется достаточно детальное представление о протекающих в рыбоводном пруду гидробиологических процессов.

Исходя из кормовой базы карпа и толстолобика, в модель включены следующие переменные: фитопланктон (*PT*), бентос (*BN*), зоопланктон (*ZO*) и бактерии (*BK*).

Для описания круговорота биогенных веществ, способных лимитировать продукционный процесс, в модель включены: растворённый минеральный фосфор (PW) и растворенный неорганический азот (NW).

Циклы биогенных элементов замыкаются детритом (DW), который, кроме того, иногда входит в рацион толстолобика.

Таким образом, для модели мы получили 9 фазовых переменных. Входными функциями модели являются климатические факторы – температура воды (T) и интенсивность солнечной радиации (I_0) на поверхности водоема. В модель включены также 4 управляющие воздействия, характеризующие внесение искусственного корма (CO – комбикорм, CU – куколки тутового шелкопряда) и минеральных удобрений (SU – суперфосфат, SE – аммиачная селитра).

Схема концептуальной модели простая (рис. 1), но в неё вошли все необходимые компоненты, с которыми связано функционирование экосистемы пруда. Предполагается, что такая схема достаточно полно отражает процессы трансформации вещества в пруду.

Построенная схема может отвечать условиям высокопродуктивной экосистемы только в том случае, если биологические процессы всех звеньев биотической цепи будут протекать на высокопродуктивном уровне.

Управление экосистемой и поддержание её на высокопродуктивном уровне достигается за счет внесения в пруд органических и минеральных удобрений. Неупорядоченное внесение органико-минеральных удобрений отрицательно сказывается на всей экосистеме и в конечном счёте на рыбопродукции пруда.

Для описания мелководного пруда глубиной порядка 1 м эффектами пространственного распределения организмов и веществ можно пренебречь, поэтому его формальной моделью будет точечная модель.

Все переменные будут рассматриваться в виде концентраций (единица измерения – $г/м^3$ или $г/м^2$). Под концентрацией живых объектов понимается отношение их суммарной живой биомассы к общему объёму водоёма.

Анализ концептуальной модели экосистемы рыбоводного пруда на качественную устойчивость. Проблема устойчивости популяций экосистемы рыбоводного пруда является одной из основных задач при её проектировании и эксплуатации. Прикладной аспект этой проблемы связан с оценкой максимальных нагрузок на экосистему, превышение которых приводит к разрушению биоценологических взаимоотношений гидробионтов, в результате чего снижается или полностью утрачивается их хозяйственная значимость.

Наиболее актуально проблема устойчивости выступает при эксплуатации рыбоводных прудов в высокопродуктивном режиме, когда взаимоотношения между гидробионтами достигают наивысшего напряжения. При этом крайне важно учитывать, что пищевые взаимоотношения гидробионтов в экосистеме являются многозвенными и представлены большим разнообразием видов на различных её уровнях.

Качественная устойчивость экосистемы пруда может определяться пластичностью пищевых взаимоотношений гидробионтов, которая в экстремальных условиях достигается путём переключений с одних пищевых объектов на другие. Она также поддерживается многообразием видов, которые чаще всего адекватно реагируют на изменения, протекающие в окружающей среде. Однако предел качественной устойчивости не является безграничным и при его превышении наблюдается разрушение как отдельных блоков (например, микробиологического, зоопланктонного и т. д.), так и всей экосистемы рыбоводного пруда в целом.

Критерий качественной устойчивости. Качественная устойчивость экосистемы означает сохранение её устойчивости при любых вариациях связей между её компонентами (видами), сохраняющими неизменным лишь тип отношений между каждой парой компонентов. Качественная устойчивость экосистемы – это свойство, определяемое только качественной структурой взаимодействий в экосистеме и независящее от их количественного выражения [2].

Количественная оценка коэффициентов формальной модели динамики популяций экосистемы всегда представляет собой нелёгкую задачу, но о характере

взаимоотношений между каждой парой видов в экосистеме можно судить с достаточной определенностью на основе информации о знаках взаимодействия между ними об устойчивости целого класса моделей, воспроизводящих динамику сообщества с заданной структурой.

Формализация понятия качественной устойчивости опирается на ляпуновскую устойчивость нетривиального равновесия системы модельных уравнений. Она сводится при этом к так называемой знак-устойчивости матрицы линеаризованной системы, т. е. способности матрицы взаимодействия между видами экосистемы для сохранения устойчивости структуры расположения в матрице плюсов, минусов и нулей [3].

Пусть $X = (x_{ij})$, $i, j = \overline{1, n}$ является матрицей взаимодействия в экосистеме, где x_{ij} представляет собой влияние j -го вида на i -ый вид. Предполагается, что в экосистеме имеется n биологических видов. Любые количественные вариации связей между видами экосистемы и внутри самих видов приводят к вариациям элементов матрицы X . Поэтому в качественно-устойчивой экосистеме устойчивость должна сохраняться при любых количественных значениях элементов x_{ij} , сохраняющих знаковую структуру.

Согласно критериям качественной устойчивости, должны выполняться следующие условия [2]:

1. $x_{ii} \leq 0$ для всех i , кроме некоторого k , для которого $x_{kk} < 0$. Это условие означает, что в качественно-устойчивой экосистеме не может быть самовозрастающих видов, и хотя бы один вид обладает самолимитированием.

2. $x_{ij} \cdot x_{ji} \leq 0$ для любых $i \neq j$. Это условие констатирует то, что в экосистеме отношения двух типов – конкуренция (--) и мутуализм (++) – должны отсутствовать.

3. Для всякого набора из трех или более различных индексов $i_1, i_2, i_3, \dots, i_n$ получается следующее произведение видов $-x_{i_1, i_2} \cdot x_{i_2, i_3} \cdot \dots \cdot x_{i_n, i_1} = 0$. В структуре экосистемы не должно быть замкнутых ориентированных циклов длиной более двух. При этом исключается ситуация всеядия: хищник питается двумя видами жертв, один из которых служит в то же время и пищей другому виду.

4. $\det X \neq 0$. Это условие означает, что соответствующий знаково-ориентированный граф (ЗОГ) содержит ориентированные циклы, суммарное число вершин которых равно количеству видов экосистемы.

5. Граф хищничества нарушает цветовой тест:

- вершины (виды) с самолимитированием чёрного цвета;
- вершины (виды) без самолимитирования белого цвета;
- каждая белая вершина связана, по крайней мере, с другой белой вершиной;
- каждая черная вершина, связанная с белой вершиной, связана также с другой белой вершиной.

Поскольку спектр исходной матрицы экосистемы представляет собой объединение спектров каждого диагонального блока матрицы экосистемы, то для знак-устойчивости матрицы экосистемы X необходимо и достаточно знак-устойчивости всех её подструктур хищничества. Таким образом, для знак-устойчивости матрицы экосистемы необходимо и достаточно выполнение условий 1–5.

Следует отметить, что класс качественно-устойчивых экосистем оказывается довольно узким. Однако отсутствие знак-устойчивости еще не означает, что экосистема вообще не может быть устойчивой. Знак-устойчивость требует максимально возможной области устойчивости и свидетельствует о большей уязвимости стабильного динамического поведения экосистемы при вариациях внутри и межвидовых связей.

Критерии знак-устойчивости дают удобный инструмент для предварительного анализа трофических структур в экосистеме с точки зрения устойчивости соответствующей динамической модели. Эти критерии свидетельствуют о важности наличия и специального расположения в структуре экосистемы видов, которые обладают саморегулированием по численности. В отдельных случаях критерии могут указать также на те связи, наличие или отсутствие которых имеет принципиальное значение для устойчивости всей экосистемы.

Согласно диаграмме потоков (рис. 1) самыми масштабными в круговороте веществ являются микробиологические процессы, на основе которых базируется вся дальнейшая жизнь рыбоводного пруда.

Микробиологические процессы заключают в себе деятельность бактерий и фитопланктона, фактически двух самостоятельных блоков. Однако между ними прослеживается как тесная взаимосвязь (рис. 2), так и антагонистические взаимоотношения, при которых интенсивная вегетация водорослей угнетает развитие бактерий. Во всех случаях преимущественное развитие фитопланктона приводит к устойчивому состоянию всей экосистемы, тогда как преобладание бактериальных процессов чаще всего завершается её разрушением.

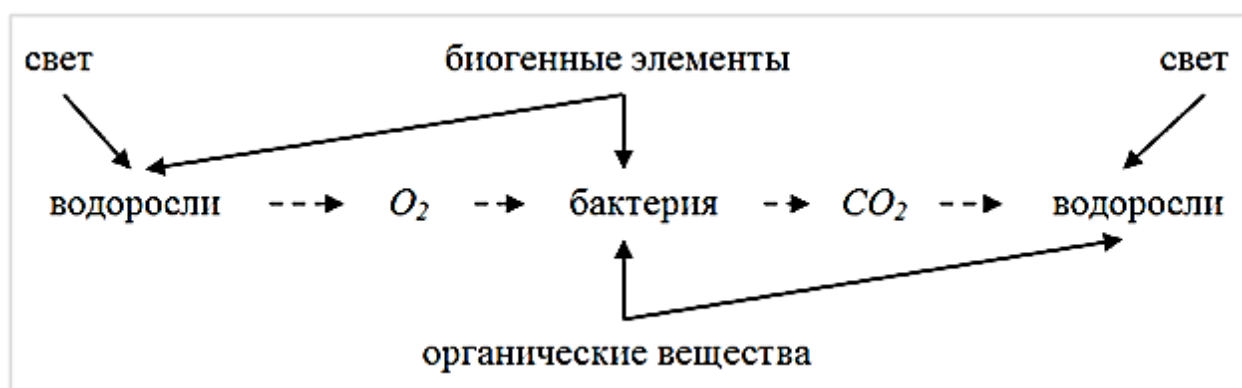


Рис. 2. Микробиологическая схема

Биомасса микроорганизмов, которая продуцируется в рыбоводном пруду, наиболее интенсивно изымается зоопланктоном и рыбами. Поэтому во многом устойчивость экосистемы определяется уровнем первичной продукции, которая должна соответствовать потребностям двух последующих блоков – зоопланктонного и рыб фитофагов. Несоответствие между продуцентами и консументами названных блоков приводит или к снижению конечной продукции или недоиспользованию биоресурсов, что во всех случаях снижает хозяйственную ценность рыбоводных прудов.

Устойчивость популяций в экосистеме высокой продуктивности необходимо рассматривать, прежде всего, как рациональное взаимоотношение гидробионтов при использовании пищевых ресурсов. Так, например, получение высокой рыбопродуктивности достигается путем подбора поликультуры рыб, максимально использующих кормовую базу рыбоводного пруда и вносимые в него корма.

Особые вопросы качественной устойчивости структур экосистем пруда. Так как класс качественно-устойчивых экосистем является узким, то в этом классе

не могут входить модели, в которых учитываются замкнутые круговороты биогенных элементов, бактерий и детрита. Перечисленные виды очень часто встречаются при моделировании всех реальных водных экосистем. В этот класс также не входят сообщества, в которых хищник питается более чем на одном трофическом уровне (в графе возникают циклы длины больше, чем два).

Однако, отсутствие знак-устойчивости ещё не означает, что экосистема вообще не может быть устойчивой, так как качественная устойчивость требует максимально возможной области устойчивости в пространстве параметров. Нарушение же качественной устойчивости свидетельствует о большей уязвимости стабильного динамического поведения экосистемы при вариации внутренних и межвидовых связей.

Так, например, представленный ниже анализ структур различной степени агрегирования, полученной из полной схемы биологических взаимодействий в рыбоводных прудах [2; 3], позволяет объяснить с позиции популяционной теории ряд эмпирически установленных эффектов. С помощью этой теории легко можно оценить стабилизирующий эффект конкуренции между рыбами (популяции карпа) по корму и дестабилизирующий эффект агрегированного переменного (бактерий + детрита), когда карп питается зоопланктоном. Учет этих эффектов особенно полезен при проектировании биологических прудов.

Если анализировать максимально агрегированную структуру «фитопланктон, зоопланктон, карп, толстолобик» на качественную устойчивость, то мы приходим к четырехкомпонентной системе. Соответствующий ЗОГ изображен на рис. 3 а.

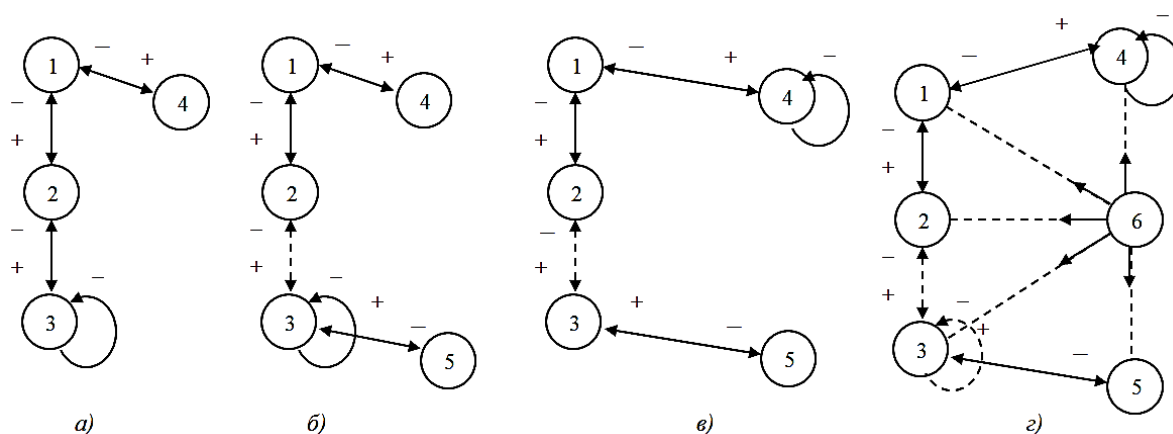


Рис. 3. Знаково-ориентированный граф (ЗОГ)

а) ЗОГ максимально агрегированной структуры рыбоводного пруда: фитопланктон – 1, зоопланктон – 2, карп – 3, толстолобик – 4;

б) учет всеядности и самолимитирования карпа – 3 (питается зоопланктоном – 2 и бентосом – 5);

в) построение качественно-устойчивой структуры при учёте всеядности карпа;

г) ЗОГ, отражающий влияние бактерий + детрита – 6 на остальные виды.

Видно, что этот ЗОГ удовлетворяет все условия 1–5 качественной устойчивости: знаки взаимодействия +-, циклы длиннее 2 отсутствуют, ЗОГ нарушает «цветовой тест» и

$$\det X = \det \begin{pmatrix} 0 & -x_{12} & 0 & -x_{14} \\ x_{21} & 0 & -x_{23} & 0 \\ 0 & x_{32} & -x_{33} & 0 \\ x_{41} & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} = x_{14} \cdot x_{41} \cdot x_{32} \cdot x_{23} > 0.$$

Рассмотрим более сложную агрегированную систему, состоящую из 5 компонент: фитопланктон, зоопланктон, карп, толстолобик и бентос (рис. 3 б). Здесь штриховая стрелка соответствует 2–3 случаю, когда карп, помимо бентоса, питается и зоопланктоном. Такая биологическая структура является качественно-неустойчивой. Но из неё можно получить качественно-устойчивую структуру. Для этого необходимо добавить минеральные и органические удобрения таким образом, чтобы нехватка пищи для карпа привела к появлению эффекта самолимитирования. ЗОГ такого устойчивого сообщества приведен на рис. 3 в.

Заметим, что в рассмотренных структурах взаимодействий пока не учитывалось действие бактерий на остальные виды. На рис. 3 г связи от бактерий + детрита – 6 к остальным видам отмечены штриховыми стрелками. ЗОГ, отражающий это воздействие, не является качественно-устойчивым, поскольку он содержит циклы длиннее 2. Таким образом, с точки зрения качественной устойчивости бактерий + детрит оказывает дестабилизирующий эффект.

Из рассмотренных примеров следует заключение методологического характера. Для того, чтобы не появился эффект самолимитирования у популяции карпа, необходимо организовать функционирование рыбоводного пруда таким образом, чтобы этот эффект (если для этого есть необходимость) появился у толстолобика.

Выводы о необходимости разработки концептуальной модели:

1) понять, как устроен исследуемый объект моделирования – экосистема рыбоводного пруда, какова её структура, внутренние связи, основные свойства, законы развития, саморазвития и её взаимодействия с окружающей средой;

2) научиться управлять экосистемой рыбоводного пруда, определяя более эффективные способы управления при заданных целях и критериях;

3) с помощью инструмента исследования и управления (компьютерной модели) экосистемой, разработанной на основе концептуальной модели, прогнозировать прямые и косвенные последствия реализации заданных способов и форм воздействия на экосистему рыбоводного пруда.

Список литературы

1. Комилов Ф. С. Компьютерное моделирование экосистем водохранилищ / Ф.С. Комилов. – Душанбе: Сохибкор, 2010. – 240 с.

2. Юнуси М.К. Математическое моделирование управляемой высокопродуктивной экосистемы рыбоводного пруда (Сообщение 3) / М.К. Юнуси, Ф.С. Комилов, Н.И. Богданов, М.С. Эгамов. – Рукопись деп. в ВИНТИ 12.03.93. – №582. – В-93. – 11 с.

3. Отчет по биологическим основам управления высокопродуктивной экосистемой рыбоводного пруда / Сост. Н.И. Богданов, Ф.С. Комилов, М.К. Юнусов, А.А. Воинов, М.С. Эгамов. – Душанбе: ИЗИП, 1988. – 24 с.

Зайнудинов Сафар Зайнудинович – канд. техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Российский государственный аграрный университет – МСХА им. К.А. Тимирязева», Россия, Москва.

Комилов Файзали Саъдуллоевич – д-р физ.-мат. наук, профессор, заведующий кафедрой Таджикского национального университета, Республика Таджикистан, Душанбе.

Мирзоев Саидаъло Хабибуллоевич – канд. физ.-мат. наук, доцент, директор филиала ФГБОУ ВО «Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова» в г. Душанбе, Республика Таджикистан, Душанбе.

Акобирзода Фотех – аспирант Таджикского национального университета, Республика Таджикистан, Душанбе.

Zaynudinov Safar Zaynudinovich – candidate of engineering sciences, associate professor of FSEI of HE “Russian state agrarian university – Moscow Timiryazev agricultural academy”, Russia, Moscow.

Komilov Fajzali Sadulloevich – doctor of physical and mathematical sciences, head of department of Tajik national university, the Republic of Tajikistan, Dushanbe.

Mirzoev Saidalo Habibuloevich – candidate of physical and mathematical sciences, associate professor, director of Dushanbe branch of FSEI of HE “Lomonosov Moscow state university”, the Republic of Tajikistan, Dushanbe.

Akobirzoda Fotekh – postgraduate of Tajik national university, the Republic of Tajikistan, Dushanbe.
