

МЕДИКО-БИОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ ВОЗДЕЙСТВИЯ ИОНИЗИРОВАННОГО ОБЛУЧЕНИЯ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

BIOMEDICAL ASPECTS OF THE EFFECTS OF IONIZED RADIATION ON THE HUMAN BODY

**S. Guliyeva
G. Garayeva**

Summary. This article analyzes open publications on this problem and in a simple accessible form answers to the main questions related to the nature of radioactive radiation and its impact on our lives. The history of the discovery of radioactive radiation is summarized. The effect of radioactive radiation on the DNA molecule is described, as well as the important role of toxic products in the mechanisms of development of ionized lesion. It is noted that the most significant radiation in ionized radiation is damage to nuclear chromatin, which often leads to cell death. The effect of ionizing radiation is manifested at all levels of biological organization at the level of macromolecules, cells, tissues, organs, and a holistic organism. The main stages in the action of radiation on biological systems are indicated.

The mechanism of biochemical processes and some peculiarities of exposure to radioactive pollution of the environment by ionizing radiation of radioactive substances of different origin, influencing.

Keywords: radiation, free radical peroxidation of lipids, deoxyribonucleic acid, membrane-bound enzymes.

Гулиева Севда Вагиф кызы

*К.б.н., доцент, Научно-исследовательский центр
Азербайджанского Медицинского Университета, г. Баку
sevda.quliyeva.1970@mail.ru*

Гараева Гюнель Галиб кызы

*Ординатор, Центральный Госпиталь Вооруженных
Сил Азербайджана, г. Баку*

Аннотация. В данной статье анализированы открытые публикации по этой проблеме и в простой доступной форме приводятся ответы на основные вопросы, связанные с природой радиоактивного излучения и его влияния на нашу жизнь. Кратко изложена история открытия радиоактивного излучения. Описано влияние радиоактивного облучения на молекулу ДНК, а также важную роль токсичных продуктов в механизмах развития ионизированного поражения. Отмечено, что наиболее существенным при ионизированном облучении является повреждение ядерного хроматина, которое часто приводит к гибели клетки. Действие ионизирующего излучения проявляется на всех уровнях биологической организации на уровне макромолекул, клеток, тканей, органов, целостного организма. Указаны основные стадии в действии излучений на биологические системы.

Рассмотрены механизм биохимических процессов и некоторые особенности воздействия радиоактивного загрязнения окружающей среды ионизирующим излучением радиоактивных веществ различного происхождения, влияющие на процессы жизнедеятельности.

Ключевые слова: радиация, свободнорадикального перекисного окисления липидов, дезоксирибонуклеиновая кислота, мембраносвязанные ферменты.

В естественных условиях каждый человек непрерывно подвергается воздействию ионизирующей радиации в результате космического излучения, вследствие излучения естественных радионуклидов, находящихся в земле, пище, растениях и в самом организме человека.

Уровень естественной радиоактивности, вызываемый естественным фоном, невелик. Организм человека привык к такому уровню облучения и он считается безвредным для него.

Изначально материя была в значительной степени радиоактивной. Но, по истечении времени большинство ядер природных радиоактивных веществ подверглись радиоактивному распаду и стали устойчивыми. Многие вещества всё ещё радиоактивны и являются

источниками ионизирующего излучения. Параллельно этому, излучения Космоса и Солнца постоянно воздействуют на организм и окружающую среду. Таким образом, вся жизнь на земле развивается в среде, которая является естественно — радиоактивной.

Ионизирующее излучение было открыто в 1895 году Вильгельмом Конрадом Рентгеном в Германии, который зафиксировал неизвестные ранее лучи, которые проникали сквозь тело человека. Эти лучи, однако, не были связаны с естественной радиоактивностью. Рентген получил их в электронной лампе, разгоняя поток электронов от одного электрода к другому. Это открытие вдохновило других учёных искать таинственные лучи, и в 1896 году было сделано следующее открытие: французский физик Анри Беккерель изучал минеральный образец урана и обнаружил, что он испускал лучи

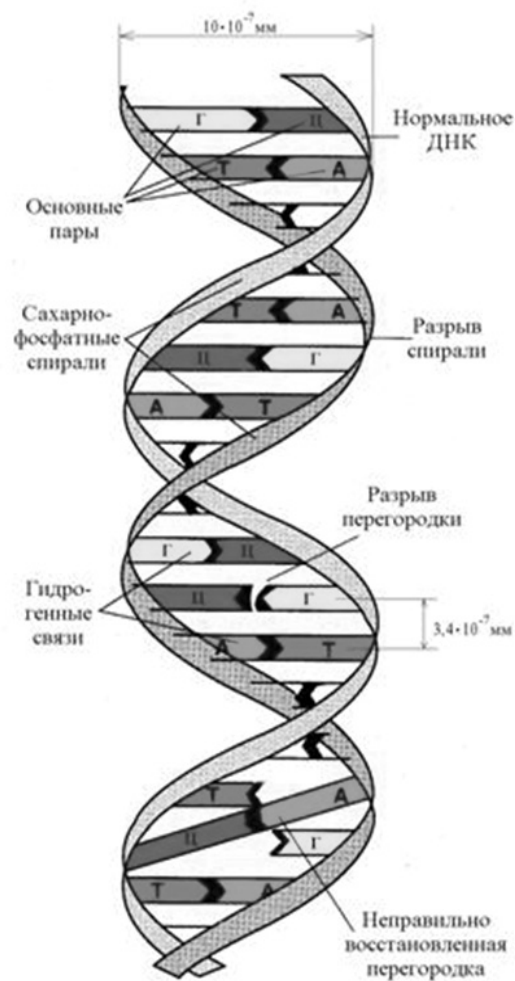


Рис. 1. Влияние радиоактивного облучения на молекулу ДНК.

того же самого типа, что и лучи Рентгена. Беккерель обнаружил явление естественной радиоактивности.

Далее поиск химических элементов, испускающих радиацию, стал более целенаправленным. В 1898 году учёные Мария и Пьер Кюри выделили два радиоактивных элемента: полоний и радий. Радий, который является высоко радиоактивным химическим элементом, скоро оказался полезным в медицине. А в то время об опасности вредного воздействия излучения на организм не было известно [11].

Многие из первопроходцев в области медицины и научных исследований были облучены, и в течение первых десятилетий прошлого столетия некоторые из них погибли от лучевой болезни.

Для того, чтобы понять картину воздействия этих лучей на наш организм нужно понять, что такое ионизирующее излучение.

Ионизирующее излучение представляет собой поток частиц, способных вызывать ионизацию вещества. При ионизации происходит отрыв электрона или нескольких электронов от атома, или молекулы, которые при этом превращаются в положительно заряженные ионы. Оторванные от атомов или молекул электроны могут присоединяться другими атомами, или молекулами, образуя отрицательно заряженные ионы. Можно и так сказать, что ионизирующее излучение — это вид энергии, высвобождаемой атомами в форме электромагнитных волн или частиц.

Радиационная опасность зависит от вида излучения (коэффициент качества излучения). Тяжелые заряженные частицы и нейтроны более опасны, чем рентгеновское и гамма-излучение.

В результате воздействия ионизирующих излучений на организм человека в тканях могут происходить сложные физические, химические и биологические

процессы. Ионизирующие излучения вызывают ионизацию молекул и атомов вещества, в результате чего молекулы и клетки ткани разрушаются.

Ионизация живых тканей сопровождается возбуждением молекул клеток, что ведет к разрыву молекулярных связей и к изменению химической структуры различных соединений [1,4,5]

Итак, рассмотрим этапы воздействия ионизированных лучей на живые организмы. Первичное действие радиации любого вида на любой биологический объект начинается с поглощения энергии излучения, что сопровождается возбуждением молекул и их ионизацией. Образующиеся в результате ионизации воды водород (H) и гидроксильная группа (OH) непосредственно либо через цепь вторичных превращений образуют продукты с высокой химической активностью: гидратный окисел (H₂O₂) и перекись водорода (H₂O₂), обладающие ярко выраженными окислительными свойствами и высокой токсичностью по отношению к ткани. Вступая в соединения с молекулами органических веществ, и прежде всего с белками, они образуют новые химические соединения, не свойственные здоровой ткани. Иначе говоря, возникают свободные радикалы, которые, включаясь в протекающие в организме химические реакции, нарушают течение обмена веществ и, вызывая появление несвойственных организму соединений, нарушают процессы жизнедеятельности [10].

Последующие биохимические процессы повреждения развиваются медленнее. Образовавшиеся активные радикалы нарушают нормальные ферментативные процессы в клетке, что ведёт к уменьшению количества богатых энергией (макроэргических) соединений. В результате цепных реакций, возникающих при поглощении энергии излучения, изменяются многие компоненты клетки, в том числе макромолекулы (дезоксирибонуклеиновая кислота (ДНК), ферменты и др.), а также малые молекулы (аденозинтрифосфорная кислота, коферменты и др.). Особой чувствительностью к облучению является синтез ДНК в интенсивно делящихся клетках. Все вышеперечисленное приводит к нарушению ферментативных реакций, физиологических процессов и клеточных структур [4].

Известно, что молекулы ДНК, представляющие главную составную часть наследственного вещества высших организмов, имеют нитевидную форму в виде двойных спиралей.

При облучении нити ДНК резко скручиваются, образуются водородные мостики между различными нитями ДНК, нарушается спиральное строение молекулы; особенно характерно разрушение двойных спиралей

ДНК, скручивание или внутримолекулярная полимеризация (образование молекулярных сеток), раскрытие двойных спиралей, разветвление и т.п. В зависимости от величины, а также мощности дозы излучения изменяется молекулярный вес и радиус спиралей ДНК. Структуры ДНК уникальны. Если повреждения молекул других типов могут быть скомпенсированы за счет оставшихся неповрежденными молекул белков, полисахаридов и т.п., то в случае ДНК такой путь исключен. Однако, если дело идет о ДНК в неделящихся клетках, повреждение каких-то участков ее цепи может и не сказаться существенно на жизнедеятельности этих клеток. Для делящихся клеток значение повреждения ДНК трудно переоценить. Если в результате облучения возникли называвшиеся ранее повреждения ДНК, например, двойные разрывы или сшивки, нормальная репликация осуществиться не может. При формировании хромосом повреждения ДНК проявляются возникновением мостов, фрагментов и других типов хромосомных aberrаций, многие из которых летальны, поскольку при них невозможно равномерное распределение генетического материала между дочерними клетками. Эта форма гибели клеток в митозе получила наименование репродуктивной гибели.

Количество повреждений ДНК, возникающих в результате облучения, достаточно велико.

Каждое из этих событий могло бы иметь фатальные последствия, если бы не существовало системы, способной ликвидировать большинство возникших повреждений ДНК. Существование в клетках механизмов и ферментных систем, обеспечивающих восстановление большинства начальных повреждений ДНК, обусловлено необходимостью поддержания стабильности генома, восстановления от постоянно возникающих повреждений ДНК в результате воздействия радиационного фона, присутствия в среде химических мутагенов, нарушений и сбоев, случайно возникающих в процессе жизнедеятельности клеток. Без таких механизмов организм не достигнет взрослого состояния, не оказавшись жертвой злокачественного образования или каких-то других последствий повреждения генетического материала. Непосредственной причиной репродуктивной гибели клеток являются невосстанавливаемые повреждения ДНК, прежде всего, двойные разрывы цепей и повреждения ДНК-мембранного комплекса [3,11].

Еще одним важным для организма результатом ионизированного повреждения ДНК является возникновение наследуемых повреждений генетического материала — мутаций, следствием которых может быть злокачественное перерождение соматических клеток (клетки тела) или дефекты развития у потомства. Вызванная облучением дестабилизация ДНК, процесс вос-

Таблица 1. Основные стадии в действии излучений на биологические системы.

Стадия	Процессы	Продолжительность стадии
Физическая	Поглощение энергии излучения; образование ионизированных и возбужденных атомов и молекул	10^{-16} – 10^{-15} с
Физико-химическая	Перераспределение поглощенной энергии внутри молекул и между ними, образование свободных радикалов	10^{-14} – 10^{-11} с
Химическая	Реакции между свободными радикалами и между ними и исходными молекулами. Образование широкого спектра молекул с измененными структурой и функциональными свойствами.	10^{-6} – 10^{-3} с
Биологическая	Последовательное развитие поражения на всех уровнях биологической организации от субклеточного до организменного; развитие процессов биологического усиления и процессов восстановления.	Секунды — годы

становления ее повреждений могут способствовать внедрению в геном клетки или активации онковирусов, ранее существовавших в геноме в репрессивном состоянии. При воздействии малых доз облучения эти процессы являются одним из наиболее существенных проявлений повреждающего действия радиации [4].

Репарация свойственна клеткам всех организмов процесс восстановления природной структуры ДНК, поврежденной при нормальном биосинтезе ее в клетке или под воздействием различных физических или химических агентов. Осуществляется специальными ферментными системами клетки.

Другая мишень действия радиации на клетки — внутриклеточные мембраны. Активация под влиянием облучения реакций свободнорадикального перекисного окисления липидов может привести к деструктивным изменениям мембран, к поражению мембраносвязанных ферментов, к нарушениям проницаемости мембран, нарушениям активного транспорта веществ через мембраны, снижению ионных градиентов в клетке, нарушениям процесса синтеза АТФ, к выходу ферментов из мест их специфической локализации, поступлению их в ядро и как следствие этого к дезорганизации ядерных структур и гибели клетки. Токсичные продукты перекисного окисления липидов, образующиеся под влиянием облучения, способны сами по себе оказывать эффекты, сходные с облучением. Их возникновение играет важную роль в механизмах развития ионизированного поражения [6,7,8].

Перечисленные процессы осуществляются в три последовательно протекающие стадии: физическую, физико-химическую и химическую в течение чрезвычайно короткого промежутка времени (в пределах 1 миллисекунды) и являются общими для действия излучений как на живую, так и на неживую материю. Последующая

биологическая стадия — вторичные, (радиобиологические), эффекты на всех уровнях организации живого, занимает значительно большее время, продолжается иногда в течение всей жизни (Табл. 1).

Действие ионизирующего излучения вызывает повреждение клеток. Различают два вида гибели клеток вследствие облучения — митотическую и интерфазную гибель [4,10].

Интерфазной гибелью называют гибель клетки до вступления её в фазу митоза, в большинстве случаев в первые часы после облучения. Этот тип гибели характеризуется расстройством всей метаболической организации клетки.

Митотическая (репродуктивная, пролиферативная) гибель возникает вследствие инактивации клетки, наступающей после облучения и после первого или последующих митозов. Поэтому даже при воздействии облучения в больших дозах этот вид гибели может проявляться через отдаленный период времени (до нескольких суток).

Интерфазная гибель является или выражением высокой радиочувствительности клетки или следствием воздействия большой дозы излучения.

Особенно важно нарушение клеточного деления — митоза, т.е. способа деления клеток, обеспечивающий тождественное распределение генетического материала между дочерними клетками и преемственность хромосом в ряду клеточных поколений. При облучении в малых дозах наблюдается временная остановка митоза. Однако, большие дозы могут вызвать полное прекращение деления или гибель клеток. В зависимости от индивидуальных особенностей организма, дозы облучения и продолжительности его воздействия эти

Таблица 2. Радиационные повреждения на всех уровнях биологической организации.

Уровень биологической Организации	Радиационные повреждения
Молекулярный	Повреждение ферментов, ДНК, РНК, нарушение обмена веществ
Субклеточный	Повреждение клеточных мембран, ядер, хромосом, митохондрий, лизосом
Клеточный	Остановка деления и гибель клеток; трансформация в злокачественные клетки
Тканевый	Повреждение ЦНС, костного мозга, желудочно-кишечного тракта
Организменный	Сокращение продолжительности жизни или смерть
Популяционный	Изменение генетической характеристики в результате мутаций

изменения могут быть обратимыми. В результате этих изменений в пораженных тканях происходят защитно-восстановительные процессы или необратимые, что приведет к поражению отдельных органов или всего организма. С увеличением дозы облучения также возрастает воздействие его на организм человека. Таким образом, частичное воздействие облучения меньшими дозами менее губительно, чем получение той же дозы облучения в течение однократного облучения суммарной дозой облучения.

При нарушении нормального хода митоза происходит хромосомные перестройки, возникновение мутаций, приводящих к нарушению в генетическом аппарате клетки, а следовательно, к изменению последующих клеточных поколений. При облучении половых клеток многоклеточных организмов нарушение генетического аппарата ведёт к изменению наследственных свойств развивающихся из них организмов. При облучении в больших дозах происходит набухание ядра (уплотнение хроматина), затем структура ядра исчезает. В цитоплазме при облучении в дозах 10000–20000 *p* наблюдаются изменение вязкости, набухание протоплазматических структур, образование вакуолей, повышение проницаемости. Всё это резко нарушает жизнедеятельность клетки.

Сравнительное изучение радиочувствительности ядра и цитоплазмы показало, что в большинстве случаев чувствительно к облучению ядро (например, облучение ядер сердечной мышцы тритона в дозе нескольких протонов на ядро вызвало типичные деструктивные изменения; доза в несколько тысяч раз большая не повредила цитоплазмы). Многочисленные данные показывают, что клетки наиболее радиочувствительны в период деления, т.е. при облучении поражаются прежде всего растущие ткани. Это делает облучение наиболее опасным для детей и беременных женщин. Именно, на этом и основана радиотерапия опухолей — расту-

щая ткань опухоли погибает при облучении в дозах, которые меньше повреждают окружающие нормальные ткани [9,10].

Возникающие в облучаемых клетках изменения ведут к нарушениям в тканях, органах и жизнедеятельности всего организма. Особенно выражена реакция тканей, в которых отдельные клетки живут сравнительно недолго. Слизистая оболочка желудка и кишечника, которая после облучения воспаляется, покрывается язвами, следствием чего является нарушение пищеварения и всасывания, а далее истощение организма, отравление его продуктами распада клеток и проникновение бактерий, живущих в кишечнике, в кровь. Нарушение целостности кроветворной системы ведёт к резкому уменьшению числа лейкоцитов в периферической крови и к снижению её защитных свойств. Параллельно снижается выработка антител, что приводит к ослаблению защитных сил организма. Уменьшается и количество эритроцитов, с чем связано нарушение дыхательной функции крови. Как было отмечено выше, ионизирующее облучение обуславливает нарушение половой функции и образования половых клеток вплоть до полного бесплодия (стерильности) облученных организмов. Особую роль в развитии ионизированного облучения животных и человека играет нервная система. Так, у кроликов смертельный исход при облучении в дозе 1000 *p* часто определяется нарушениями в центральной нервной системе, вызывающими остановку сердечной деятельности и паралич дыхания. Исследования биоэлектрических импульсов мозга облученных животных и людей, подвергающихся лучевой терапии, показали, что нервная система раньше других систем организма реагирует на радиационное воздействие [2,3].

Биологическое воздействие ионизирующих излучений в значительной степени зависит от состояния центральной нервной системы и внутренних органов. Нервные заболевания, а также заболевания сердеч-

но-сосудистой системы, кроветворных органов, почек, желез внутренней секреции снижают выносливость человека к облучению [11,16].

В результате облучения могут наблюдаться следующие основные виды клеточных реакций: угнетение деления, разные типы хромосомных aberrаций и различные летальные эффекты. Угнетение клеточного деления относится к функциональным неспецифическим клеточным нарушениям, носит временный, обратимый характер и может наблюдаться как у одноклеточных организмов, так и у клеток, составляющих ткани высших организмов. Как правило, угнетение клеточного деления является результатом воздействия малых доз излучения. При воздействии больших доз клеточное деление полностью прекращается и приводит к бесплодию. При воздействии разных видов излучений длительность обратимого угнетения клеточного деления и процент клеток, у которых деление полностью прекратилось, возрастают по мере увеличения дозы излучения. С увеличением дозы излучений все большее число клеток теряет способность к размножению или у них временно прекращается процесс деления. Одним из показателей нарушения этой способности клеток к размножению как у одноклеточных, так и у клеток тканей высших организмов является возникновение гигантских форм клеток.

Итак, наиболее существенным при ионизированном облучении является повреждение ядерного хроматина, которое часто приводит к гибели клетки (летальный эффект), либо к возникновению в ней передающейся по наследству мутации. Результатом последней может явиться, например, злокачественное перерождение

клетки и развитие через несколько лет новообразования (генетический эффект) [8].

Действие ионизирующего излучения проявляется на всех уровнях биологической организации на уровне макромолекул, клеток, тканей, органов, целостного организма (табл. 2). Последствием его является возникновение местных изменений (лучевые ожоги, некрозы, катаракты) и общими явлениями (острая хроническая лучевая болезнь), а также отдалёнными последствиями (злокачественные новообразования, гемобластозы, наследственная патология, нарушения репродуктивной функции, функций нейро-эндокринной, иммунной и др. систем, снижение адаптационных возможностей, преждевременное старение, уменьшение средней продолжительности жизни) [4,14,15].

В связи с текущими вызовами современного общества и научно-техническим прогрессом становится необходимостью постоянного совершенствования наших представлений в отношении ионизированных облучений. Конечно же, мы не имеем право остановить эволюцию человеческой цивилизации, что, несомненно, предполагает развитие ядерной энергетики и ядерных технологий, медицинских радиологических процедур, а также космических полетов. Увы, это связано с социальными рисками ядерной войны или локальными военными конфликтами. Поэтому есть необходимость быть готовыми к этому и вооружиться доказательными научными данными для того, чтобы защитить людей. Нужно продолжать проведение комплексных исследований медицинских последствий влияния ионизированного облучения на организм человека в целом и изучение их биологических механизмов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Алексахин Р.М., Книжникова В.А., Тоскаева А.И. К вопросу о малых дозах ионизирующих излучений. //Радиобиология, М., 1986, т. 26, вып.3, С.292–295.
2. Аклеев А.В., Крестинина Л.Ю., Варфоломеева Т.А. Остроумова Е.В., Пушкарев С.А., Шалагинов С.А., Худякова О.И., Веремеева Г.А., Возилова А.В., Холл П. Медикобиологические эффекты хронического воздействия ионизирующей радиации на человека //Медицинская наука и образование Урала. 2008. Том 9, № 2, С. 8–10.
3. Бак З., Александер П.А. Основы радиобиологии //пер. с англ. М., 1963, 500 с.
4. Бекман И.Н. Радиационная и ядерная медицина: физические и химические аспекты. //Радиохимия. Том VII: учебное пособие МО, Щёлково: Издатель Мархотин П.Ю., 2012, 400 с.
5. Борщеговская П.Ю., Розанов В.В., Студеникин Ф.Р. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом: Учеб. пособие, М.: ООП физического факультета МГУ, 2019, 78 с.
6. Гродзенский Д.Э., Радиобиология. //Издательство "Атомиздат", М., 1966, 231 с.
7. Корогодина В.И. Проблемы пострадиационного восстановления //Издательство "Атомиздат" М., 1966, 390 с.
8. Корогодина В.И., Красавин Е.А. 1982. Факторы, определяющие различия в биологической эффективности ионизирующих излучений с разными физическими характеристиками. //Радиобиология 22(6), С. 727–738.
9. Козлов А.А. К проблеме «малых доз» в радиобиологии //Радиобиология. 1988, т. 28, № 3, С.424–426.
10. Кузин А.М., Радиационная биохимия. //Издательство Академии Наук СССР, М. 1962, 336 с.
11. Кудряшов Ю.Б., Беренфельд Б.С. Радиационная биофизика (Курс лекций по биологическому действию ионизирующих излучений) М.: Из-во Моск. ун-та, 1972, 242с.

12. Ливанов М.Н. Некоторые проблемы действия ионизирующей радиации на нервную систему. //Медгиз, М., 1962, 196 с.
13. Радиационная медицина: учеб. пособие / А.Н. Гребенюк, В.И. Легеза, В.И. Евдокимов, Д.А. Сидоров; под. ред. С.С. Алексанина, А.Н. Гребенюка; Всерос. центр. экстрен. и радиац. медицины им. А.М. Никифорова МЧС России.; 2013, Ч. I: Основы биологического действия радиации, 124 с.
14. Тимофеев-Ресовский Н.В. В кн. «Первичные механизмы биологического действия ионизирующих излучений». //М., Изд-во АН СССР, 1963, С. 162.
15. Шапиро Н.И. Радиационная генетика. В сб.: Основы радиационной биологии. //М., Наука, 1964, С.131.
16. Mettler F.A., Upton A.C. Medical effects of ionizing radiation. //Philadelphia: W.B. Saunders. 1995, 430 pp.

© Гулиева Севда Вагиф кызы (sevda.quliyeva.1970@mail.ru), Гараева Гюнель Галиб кызы.
Журнал «Современная наука: актуальные проблемы теории и практики»



г. Баку