

УДК 621.383; 621.472(575.4)

## НАУЧНЫЙ ОБЗОР: ГЕОИНФОРМАЦИОННЫЕ СИСТЕМЫ В РАЗВИТИИ ВЕТРОЭНЕРГЕТИКИ ТУРКМЕНИСТАНА

Пенджиев А.М.

*Туркменский государственный архитектурно-строительный институт, Ашхабат,  
e-mail: ampenjiev@rambler.ru*

В статье рассматривается научный обзор геоинформационные системы (ГИС) и создание геоинформационных технологий (ГИТ), которые позволяют оперативно и подробно анализировать на основе имеющейся географически привязанной информации различные альтернативные варианты для проведения оценки последствий вариантов проектирования установок, в той или иной области ветроэнергетики с целями обеспечения устойчивого развития региона. В основном это относится к энергетическим объектам и системам, использующие ветроэнергетические ресурсы, с их высокой пространственной и временной неравномерностью и изменчивостью. В соответствии со стоящими задачами, определяющими необходимые расчетные параметры, и встают требования к исходной физико-географической, природно-климатической, метеорологической, ветроэнергетического ресурсов и информации энерго-экопотенциала, необходимой для создания базы данных ГИС. Оценки ветроэнергетических ресурсов и его распределения по территории затруднено ограниченностью объема энергопотенциала по времени и в пространстве. С помощью ГИС можно решить энергетические, экономические, экологические, социальные вопросы и возможности смягчения изменения климата на основе ветроэнергетических установок, и их ресурсы, экологические выгоды, цели и задачи на научно-методических основах в области ветроэнергетики для реализации государственных программ Туркменистана энергообеспечения региона. На основе ГИС технологий составлена карта ветроэнергетических ресурсов и экологических потенциалов на территории Туркменистана.

**Ключевые слова:** возобновляемая энергетика, ветроэнергетика, геоинформационные системы, технологический, эконенергетика, экология, экобизнес, Туркменистан.

## THE SCIENTIFIC REVIEW: GEOINFORMATION SYSTEMS IN DEVELOPMENT WIND OF POWER IN TURKMENISTAN

Penjiyev A.M.

*Turkmen State Institute of Architecture and Construction, Ashabad, e-mail: ampenjiev@rambler.ru*

In article the scientific review geoinformation systems (GIS) and creation geoinformation technologies (GIT) which allow operatively and to analyze in detail on the basis of the available geographically adhered information various alternative variants for carrying out of an estimation of consequences of variants of designing of installations, in this or that area of solar power c the purposes of maintenance of a sustainable development of region is considered. Basically it concerns power objects and the systems, using solar power sources, with their high spatial both time non-uniformity and variability. According to the standing problems defining necessary settlement parameters, also there are requirements to initial fiziko-geographical, prirodno-climatic, metrological, solar power resources and information energo-ekopotentsiala, database GIS necessary for creation. Estimations of solar power resources and its distribution on territory it is complicated by limitation of volume energy potential (энергопотенциала) on time and in space. By means of GIS it is possible to solve power, economic, ecological, social questions and possibilities of softening of change of a climate on the basis of solar power installations, and their resources, ecological benefits, the purposes and problems on scientifically-methodical bases in the field of solar power for realisation of government programs of Turkmenistan of power supply of region. On the basis of GIS technologies the database is made, empirical formulas of solar power resources and ecological potentials on areas of Turkmenistan are deduced.

**Keywords:** renewable energy, wind energy, geographic information systems, technology, bio-energy, ecology, ekobiznes, Turkmenistan.

**Актуальность проблемы.** Предметно и заинтересованно рассматриваются и возможности отправки туркменских энергоносителей в западном направлении. Наша энергетическая стратегия основывается на принципе многовариантности энергетических потоков, расширения их географии, вовлечения все большего числа стран, заинтересованных в участии в международных энергетических процессах. Это не механическое складывание государств и территорий в некие искусственные схемы, подчеркнул Президент Гурбангулы Бердымухамедов на состоявшемся Форуме Энергетической Хартии «Надежный и стабиль-

ный транзит энергоносителей» 9 декабря 2014 г. Речь здесь идет об объективных тенденциях в геоэкономике, когда именно диверсификация, наличие альтернативных маршрутов поставок выступают решающим условием глобальной энергетической безопасности, устойчивости всей системы мирохозяйственных связей, их гарантий от односторонности и структурных деформаций. В этом, на наш взгляд, заключена сама суть устойчивой энергетики, сказал лидер нации.

При этом Туркменистан отводит особую роль вопросам энергоэффективности и энергосбережения, использования возоб-

новляемых источников энергии. Их обсуждение сегодня должно стать важнейшей и органичной частью международного энергетического диалога, выразил убежденность глава государства. Бережное и дальновидное отношение к экологии, к сохранению естественной природной среды – еще один ключевой компонент современного энергетического цикла. Объективное требование дня – использование инновационных технологий и методов управления при создании энергетической производственной и транзитной инфраструктуры. Высокая экологичность мировой добычи углеводородов сегодня становится синонимом ее эффективности.

Наша общая задача – совместить объективные экономические интересы, реалии международного партнерства с необходимостью сохранения экологического баланса. В этом контексте Туркменистан готов к дальнейшему расширению и активизации сотрудничества с международными структурами с целью минимизации экологических рисков при добыче энергоресурсов, внедрения в производственный цикл эффективных защитных технологий, применения современных управленческих решений. Лидер нации также подчеркнул, что в нашей стране методы добычи углеводородных ресурсов сегодня отвечают самым высоким экологическим стандартам, создана соответствующая нормативно-правовая база.

Принятая «Национальная стратегия Туркменистана по изменению климата» подразумевает поэтапный переход всех основных сфер производственной деятельности государства на параметры экологической безопасности. Эта стратегия предусматривает приоритетность развития высокотехнологичных отраслей, создание условий для развития «зеленой экономики» в качестве базового элемента функционирования всей инфраструктуры жизнеобеспечения страны. Это в полной мере относится к сфере топливно-энергетического комплекса. Мы признательны международным организациям, и прежде всего Организации Объединенных Наций, ее специализированным агентствам за конструктивный подход и оказанное содействие в этих вопросах. Мы готовы к самому тесному взаимодействию в рамках Энергетической Хартии, заявил Президент Туркменистана Гурбангулы Бердымухамедов [1, Газета «Нейтральный Туркменистан» 10.12.2014 г].

Рациональное использование топливно-энергетических ресурсов представляет собой одну из глобальных мировых проблем, успешное решение, которой будет иметь определяющее значение не только для дальнейшего развития мирового сообщества, но и для сохранения среды его обитания – биосферу. Одним из перспективных путей решения этой проблемы является применение новых энергосберегающих технологий, использующих нетрадиционные возобновляемые источники энергии [1,24,31-33].

Несмотря на то, что современная энергетика в основном базируется на невозобновляемых источниках энергии (около 80% в мировом энергетическом балансе составляют нефть, газ и каменный уголь), интерес к возобновляемым источникам энергии (ВИЭ) неуклонно растет. Главными аргументами для использования ВИЭ являются высокая цена традиционного топлива, энергетическая безопасность для стран-импортеров нефти и газа и проблемы охраны окружающей среды.

В этой связи одной из важнейших научно-технических проблем народного хозяйства в энергетической отрасли является обеспечение геоинформационными технологиями (ГИТ) и поддержка принятия управленческих решений государственных органов в сфере планирования развития сектора энергообеспечения на основе ВИЭ. Стратегия развития энергетике для любого региона Туркменистана и вовлечение ВИЭ в его энергетический баланс напрямую зависят от имеющегося потенциала, как по отдельным видам, так и по совокупности видов ВИЭ (комплексного потенциала) [4,10-12].

Изучение неравномерностей пространственного распределения потенциала ВИЭ и выявление наиболее перспективных районов под строительство энергогенерирующих объектов в совокупности с анализом инфраструктуры в данных районах эффективно при использовании специализированных технологий геоинформационного моделирования.

В настоящее время отсутствуют исследования, посвященные вопросам применения геоинформационных технологий для выполнения пространственного моделирования потенциала возобновляемых энергоресурсов. Геоинформационные системы (ГИС) в данной предметной области используются, как правило, только для визуа-

лизации точечных результатов рассчитанных величин. Это выполняется по следующей схеме: а) рассчитываются точечные значения потенциала, б) с использованием ГИС общего назначения выполняется интерполяционное сглаживание по пространству, в) в той же ГИС общего назначения результаты визуализируются в виде карты ареалов или изолиний. Применение такой схемы оправдано при максимальной плотности исходных точечных данных, которая может быть обеспечена лишь на мелких масштабах. При работе со средними и крупными масштабами необходим другой подход. Подход, в рамках которого будут учитываться различия в плотности исходных данных параметров, влияющих на значение потенциала источников возобновляемых энергоресурсов, и каждый параметр будет рассмотрены отдельно в процессе иерархического решения поставленных задач [4,10-24,34].

Исходя из выше приведенных задач, автор подготовил статью, конечно, он осознает, что при написании статьи не все задуманное удалось реализовать в полном объеме. Он прекрасно понимает, что он делает первые шаги в этом направлении, поэтому имеются недостатки как в теоретическом плане, так в практической и прикладной части. Но тем не менее вопрос использования ГИС технологий в области применения ветроэнергетики для смягчений антропогенных нагрузок на окружающую среду с помощью возобновляемых источников энергии стоит, а на вопрос изменение климата уже нужно принимать меры сейчас. Использованные материалы и методика подхода могут быть полезны для применения их не только в Туркменистане, но и в других странах мира.

**Цели задачи статьи.** Научный обзор для разработки информационных технологий и расчетное обеспечения геоинформационного моделирования для решения задач оценки пространственного распределения возобновляемых энергоресурсов Туркменистана и определения пространственного распределения ветроэнергетических ресурсов, потенциала на территориях страны.

Предметом исследования являются теоретические расчеты, методологические основы разработки и применения геоинформационных технологий для построения карт пространственного распределения ветроэнергоресурсов, а также определения

экологического потенциала от использования на территориях Туркменистана.

**Научная новизна.** Из научного обзора предложены принципы построения новой ГИС технологии для решения задач комплексной оценки возобновляемых ресурсов в частности ветроэнергоресурсов и экологического потенциала на территориях Туркменистана. Впервые с применением геоинформационных технологий построены: энергетическая и экологическая карта потенциала ветроэнергоресурсов и рассчитаны технически доступные ветроэнергоресурсы для электроснабжения отдаленных районов страны.

### **1. Научный обзор возможности использования геоинформационной системы в области возобновляемой энергетики**

Напомню, что это такое геоинформационные системы? Геоинформационные системы (ГИС) – это интегрированные в единой информационной среде электронные пространственно-ориентированные изображения (карты, схемы, планы и т.п.) и базы данных (БД). В качестве БД могут использоваться теоретические расчеты, таблицы, паспорта, иллюстрации, расписания и т. п. Такая интеграция значительно расширяет возможности системы и позволяет упростить аналитические работы с координатно-привязанной информацией [4,10-12,23, 24,34].

ГИС характеризуются следующими положительными моментами:

- наглядность представления семантической информации из БД за счет отображения взаимного пространственного расположения данных;
- увеличение информационной емкости продукта за счет связи пространственно-ориентированных изображений с семантической информацией из БД;
- улучшение структурированности информации и, как следствие, повышение эффективности ее анализа и обработки.

Традиционный набор функций ГИС при работе с картой включает:

- показ карты в различных масштабах;
- выбор набора слоев информации для показа;
- зависимость внешнего вида объектов от их семантических характеристик;
- оперативное получение информации об объекте при выборе его курсором мыши;
- возможность распечатки любых фрагментов карты.

Перечислить все области возможного применения ГИС затруднительно. Наибольшее распространение они получили в следующих отраслях:

- землеустройство (земельные кадастры);
- муниципальное хозяйство;
- энергетика;
- транспорт и связь.

На отечественном рынке создание ГИС сдерживается дороговизной специализированных программных средств, длительными сроками разработки и высокими требованиями к "компьютерной" квалификации персонала [10-12].

**Области применения и использования ГИС-технологий.** Ученые подсчитали, что 85% информации, с которой сталкивается человек в своей жизни, имеет территориальную привязку. Поэтому перечислить все области применения ГИС просто невозможно. Этим системам можно найти применение практически в любой сфере трудовой деятельности человека.

ГИС эффективны во всех областях, где осуществляется учет и управление территорией и объектами на ней. Это практически все направления деятельности органов управления и администраций: земельные ресурсы и объекты недвижимости, транспорт, инженерные коммуникации, развитие бизнеса, обеспечение правопорядка и безопасности, управление ЧС, демография, экология, здравоохранение и т.д.

ГИС позволяют точнейшим образом учитывать координаты объектов и площади участков. Благодаря возможности комплексного (с учетом множества географических, социальных и других факторов) анализа информации о качестве и ценности территории и объектов на ней, эти системы позволяют наиболее объективно оценивать участки и объекты, а также могут давать точную информацию о налогооблагаемой базе.

В области транспорта ГИС давно уже показали свою логистическую эффективность благодаря возможности построения оптимальных маршрутов, как для отдельных перевозок, так и для целых транспортных систем, в масштабе отдельного города или целой страны. При этом возможность использования наиболее актуальной информации о состоянии дорожной сети и пропускной способности позволяет строить действительно оптимальные маршруты [4,10-12,23,24,34].

Учет коммунальной и промышленной инфраструктуры – задача сама по себе не простая. ГИС не только позволяет эффективно ее решать, но и также повысить отдачу этих данных в случае чрезвычайных ситуаций. Благодаря ГИС специалисты различных ведомств могут общаться на общем языке.

Интеграционные возможности ГИС истине безграничны. Эти системы позволяют вести учет численности, структуры и распределения населения и одновременно использовать эту информацию для планирования развития социальной инфраструктуры, транспортной сети, оптимального размещения объектов здравоохранения, противопожарных отрядов и сил правопорядка.

ГИС позволяют вести мониторинг экологической ситуации и учет природных ресурсов. Они не только могут дать ответ, где сейчас находятся «тонкие места», но и благодаря возможностям моделирования подсказать, куда нужно направить силы и средства, чтобы такие «тонкие места» не возникли в будущем.

С помощью геоинформационных систем определяются взаимосвязи между различными параметрами (например, почвами, климатом и урожайностью сельскохозяйственных культур), выявляются места разрывов электросетей.

Риэлторы используют ГИС для поиска, к примеру, всех домов на определенной территории, имеющих шиферные крыши, три комнаты и 10-метровые кухни, а затем выдачи более подробного описания этих строений. Запрос может быть уточнен введением дополнительных параметров, например, стоимостных. Можно получить список всех домов, находящихся на определенном расстоянии от конкретной магистрали, лесопаркового массива или места работы [34].

Компания, занимающаяся инженерными коммуникациями, может четко спланировать ремонтные или профилактические работы, начиная с получения полной информации и отображения на экране компьютера (или на бумажных копиях) соответствующих участков, скажем водопровода, и заканчивая автоматическим определением жителей, на которых эти работы повлияют, с уведомлением их о сроках предполагаемого отключения или перебоев с водоснабжением.

Для космических и аэрофотоснимков важно то, что ГИС могут выявлять участки

поверхности с заданным набором свойств, отраженных на снимках в разных участках спектра. В этом – суть дистанционного зондирования. Но на самом деле эта технология может с успехом применяться и в других областях. Например, в реставрации: снимки картины в разных областях спектра (в том числе и в невидимых).

Геоинформационная система может использоваться для осмотра как больших территорий (панорама города, штата или страны), так и ограниченного пространства, к примеру, зала казино. С помощью этого программного продукта управленческий персонал казино получает карты с цветовым кодированием, отражающим движение денег в играх, размеры ставок, взятие «банка» и другие данные из игорных автоматов.

ГИС помогает, например, в решении таких задач, как предоставление разнообразной информации по запросам органов планирования, разрешение территориальных конфликтов, выбор оптимальных (с разных точек зрения и по разным критериям) мест для размещения объектов и т. д. Требуемая для принятия решений информация может быть представлена в лаконичной картографической форме с дополнительными текстовыми пояснениями, графиками и диаграммами.

ГИС служат для графического построения карт и получения информации как об отдельных объектах, так и пространственных данных об областях, например о расположении запасов природного газа, плотности транспортных коммуникаций или распределении дохода на душу населения в государстве. Отмеченные на карте области во многих случаях гораздо нагляднее отражают требуемую информацию, чем десятки страниц отчетов с таблицами. Использование такой методики и составления ГИС карты в возобновляемой энергетике, тем более в ветроэнергетике будет очень приемлемой [4,10-12,23,24,34].

**Особенности возобновляемых источников энергии.** Возобновляемая энергетика характеризуется многогранностью, разнообразием характеризующих её критериев и составляющих. В перечне задач, возникающих при осуществлении проектов возобновляемой энергетике (ВЭ) (помимо технологических и технических), особо выделяются проблемы оценки возможности и энергоэффективности использования возобновляемых источников энергии (ВИЭ)

для энергоэкологообеспечения регионов [4-10-12].

Очевидно, что при этом с одной стороны необходимы обширные массивы информации, охватывающей как природные ресурсы территории, так и экономические, экологические характеристики региона (инфраструктура энергетики, энергетические балансы, линии электропередач, наличие отраслей промышленности; характеристики сельскохозяйственного производства, пастбищных животноводческих хозяйств и прочие другие.). С другой стороны, необходимо привлечь такие инструменты анализа, которые позволяли бы собирать, оперативно модернизировать и преобразовывать эти массивы данных, отображать их путем всестороннего анализа и получать на их основе обоснованные оценки и делать технологические расчеты.

Одновременно следует учитывать, что зачастую пользователя интересуют комплексные оценки по различным видам источников энергии. В конкретных регионах наиболее эффективным может стать либо использование гибридных энергоустановок, либо создание нескольких установок (станций) на различных типах энергии. В связи с комплексностью указанной проблемы, а также известной «региональностью» возобновляемой энергетике, становится возможным и актуальным использование инструментария геоинформационных технологий.

В настоящий момент за рубежом имеется достаточно успешный опыт использования ГИС-технологий в области возобновляемой энергетике. Энергетические компании широко используют геоинформационные системы для разработки проектов, но экологические потенциалы не достаточно изучены [4,10-12,23,24,34].

С использованием локальных ГИС технологий были проведены целый ряд исследований, использования позволила интегрировать и в комплексе проанализировать многие лимитирующие факторы проекта, такие как пути и интенсивность судоходства, территории разработки нефтяных месторождений и пути прокладки нефтепроводов, маршруты миграции птиц, ограничения со стороны военных ведомств и т.д. При оценках учитывалось влияние каждого из этих факторов, что обеспечило детальный анализ пригодности и экологической чувствительности того или иного участка в

процессе выбора мест для строительства энергетических объектов.

Рассмотренные в ходе исследования зарубежных авторов по геоинформационным ресурсам по ВЭ можно подразделить по охвату территории на: локальные, региональные, национальные, глобальные.

По направленности ГИС можно выделить однокомпонентные ГИС (рассматривается только один из ВИЭ: солнце, или ветер, или биомасса и т.п.) и многокомпонентные (включающие в себя несколько ВИЭ).

По типу информации, включаемой в основу ГИС ВИЭ, и используемой для оценки целесообразности и выгоды проектов по ВИЭ можно выделить:

- Данные для оценки ресурсов ВИЭ (комплекс метеорологических и актинометрических данных, описание гидрогеологических скважин с данными о физических и химических характеристиках геотермальных месторождений, гидрологические данные, данные по ветренности, отходам производств и жизнедеятельности человека, населению и прочие др.);

- Технические характеристики установок на ВИЭ (для расчетов предполагаемой выработки электроэнергии);

- Экономические предпосылки (цены на энергию от традиционных и нетрадиционных источников в целях сравнения и создания экобизнеса на основе квот);

- Энергетические балансы регионов (предприятия, производящие энергоустановки на ВИЭ, инвестиции в данную область, налоговые льготы на использование ВИЭ, зарплаты работников объектов на ВИЭ и т.д.);

- Социальные предпосылки (занятость населения и потенциальные рабочие места от строительства объектов на ВИЭ, соотношение новых рабочих мест и прогнозируемого объема вырабатываемой энергии, уменьшение негативных факторов, влияющих на здоровье населения за счет снижения вредных выбросов и т.д.);

- Экологические аспекты: величина снижения вредных выбросов при использовании ВИЭ, снижение загрязнения почв и воды, уровня радиации (выбросов криптона в районах, где использовались атомные электростанции и т.д.) [4,10-12].

В статье, основываясь на вышеизложенный материал, сделан упор на использования ГИС технологий в ветроэнергетике Туркменистана.

## 2. Обзор ветрового режима и его особенности в Туркменистане

### *Климатологические характеристики ветровой обстановки в Туркменистане.*

Ветер на различных высотах в атмосфере Земли для каждой точки ее поверхности характеризуются его скоростью, которая, строго говоря, является случайной переменной в пространстве и времени, зависящей от многих факторов местности, сезона года и погодных условий.

Все процессы, напрямую связанные с использованием текущего значения скорости ветра, в частности, производство электроэнергии в ветроэлектрических установках, имеют сложный характер, так что их характеристики обладают статистическим разбросом и неопределенностью средних ожидаемых значений. Поэтому на современном уровне исследований задача их оценки формируется как создание вероятностного описания случайного процесса посредством разбиения всего временного процесса на отдельные временные интервалы, в пределах каждого из которых можно использовать приближение стационарности, т.е. независимости всех определяемых параметров от времени. В качестве периода стационарности могут быть приняты различные временные интервалы с соответствующей точностью описания в зависимости от реальных условий случайного процесса. В частности, в некотором приближении можно считать процесс стационарным во всем рассматриваемом промежутке времени, например, в течение года.

Климат Туркменистана резко континентальный с короткой, довольно холодной зимой и сухим жарким продолжительным летом. Осадков выпадает небольшое количество (в основном 100–200 мм), преимущественно в холодный период года. Ветровой режим формируется под влиянием циркуляционных факторов и местных физико-географических особенностей, смотрите рисунок 1 [1,2,24-28,31-33].

Для холодного периода рассматриваемой территории наиболее характерна юго-западная периферия сибирского антициклона, а также выходы с юга южно-каспийских и мургабских циклонов. В январе на побережье Каспийского моря наблюдаются преимущественно восточные ветры, вызванные в силу муссонной циркуляции смещением воздуха с холодной суши на более теплое море (повторяемость 30–40%).

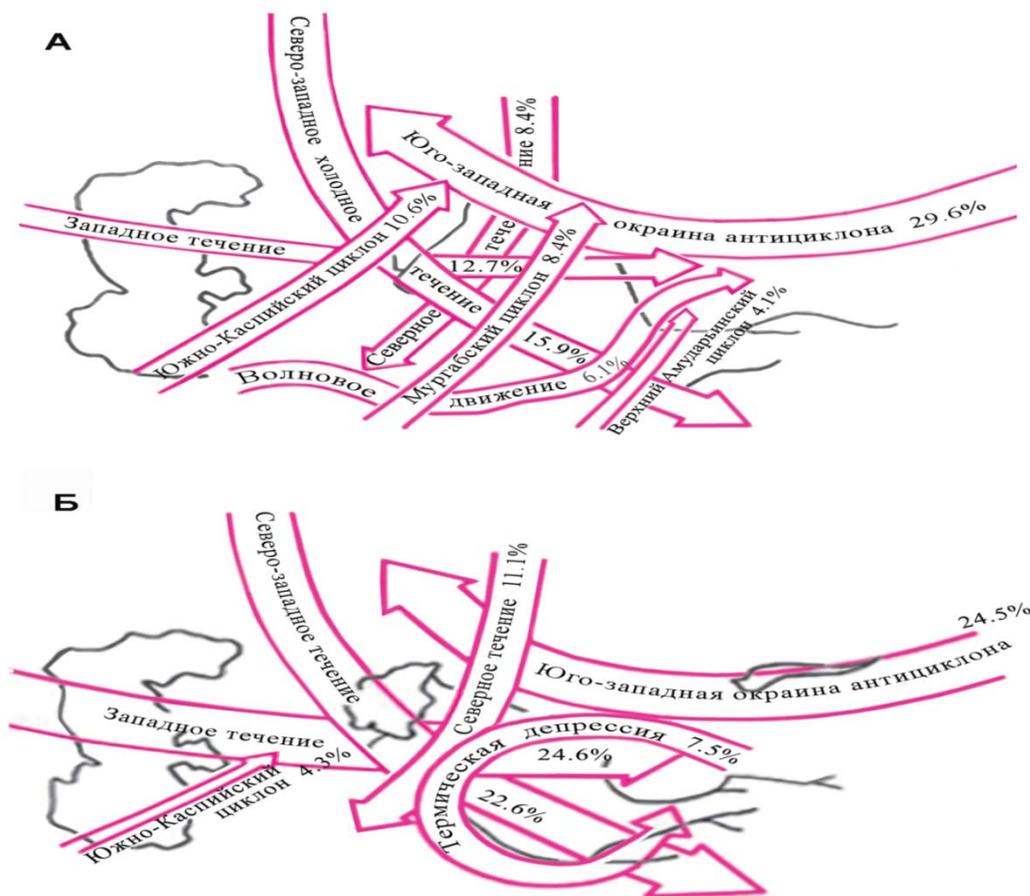


Рис. 1. Схема формирования климата Центральной Азии:  
А – в холодный период; Б – в жаркий период

В Центральных Каракумах наиболее часты восточные и северо-восточные ветры (повторяемость 25–35%), обусловленные в основном юго-западной периферией сибирского антициклона, а также выходом южно-каспийских циклонов. По крайнему юго-востоку Туркменистане в это время года наблюдаются преимущественно юго-восточные и северо-западные потоки воздуха (повторяемость 15–25%). Такому распределению воздушных потоков здесь способствуют горные хребты Нуратау, Актау и Гиссарский, которые являются барьером и заставляют воздух обтекать их.

**Воздушные течения и их изменение по сезонам года в Туркменистане.** На формирование климата Туркменистана большое влияние оказывает циркуляция атмосферы. К ней относятся воздушные течения различных типов, их трансформация и атмосферные фронты.

Летом на территорию Туркменистана с юга проникает тропическое воздушное те-

чение, температура воздуха повышается до +40–46°C. А зимой с проникновением с севера полярного и арктического воздушных течений температура воздуха снижается до 20–30°C.

В южной части Туркменистана в течение года 15 дней удерживаются характерные для холодного периода года арктическая воздушная масса, европейская полярная воздушная масса – 92 дня, сибирская полярная воздушная масса – 20 дней, около 140 дней туранская полярная воздушная масса. А в тёплый период года здесь 25 дней, наблюдается проникающая с южных широт иранская тропическая воздушная масса, 3 дня средиземноморская тропическая воздушная масса, около 40 дней туранская тропическая воздушная масса. Связанные с ними теплые и холодные фронты в течение года наблюдаются 84 раза [1,2,24–28].

Проникновение на территорию Туркменистана различных воздушных масс в течение года, и их изменение создают своео-

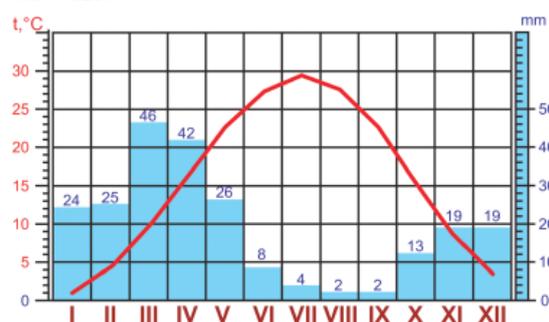
бразные погодные условия, то есть синоптическую ситуацию.

На погодные условия Туркменистана также оказывает действие обширное волнообразное воздушное течение, медленнодвигающийся циклон на севере Центральной Азии.

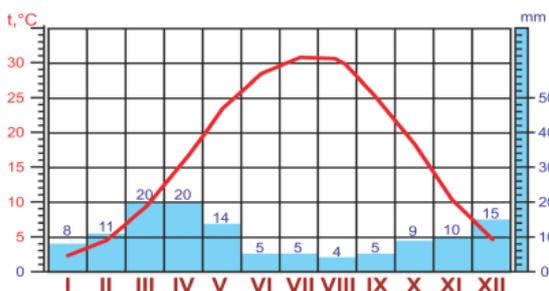
**Южный Каспийский циклон.** Краткую характеристику его свойств мы даем на примере Туркменистана. В Туркменистан этот циклон проникает с юго-запада. При этом почти вся территория страны оказывается под влиянием континентальной или морской тропической воздушной массы. В это время средняя суточная температура воздуха повышается зимой до 5-10°C, весной и осенью до 15-20°C. Осадки больше выпадают на наветренной стороне горных хребтов, а на подветренной стороне господствуют сухие и тёплые ветра.

**Южный Мургабский циклон.** Он формируется в междуречье Теджена и Мургаба. Благодаря этому циклону на территорию Туркменистана с севера проникают континентальные и морские полярные воздушные массы. В это время температура воздуха находится зимой в пределах 0-5°C, весной – 10-20°C, осенью – 10-15°C. Большее количество осадков выпадает в нижнем течении р. Мургаб [2].

**Верхний Амударьинский циклон** проникает на территорию Туркменистана с юга и отличается от других очень редкой повторяемостью.

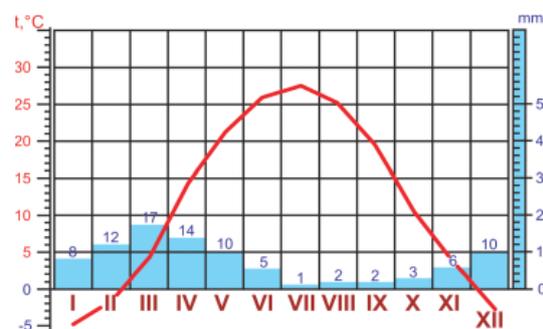


Средняя месячная температура воздуха и количество осадков в Ашхабаде

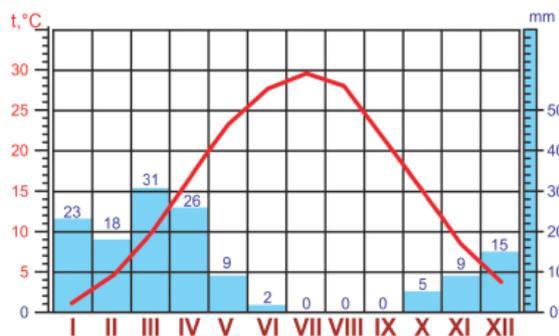


Средняя месячная температура воздуха и количество осадков в Балканабаде

Этот циклон отличается теплой температурой воздуха (5-10°C) зимой и высокой температурой (35-40°C) в летнее время. При такой синоптической ситуации атмосферные осадки выпадают очень мало.

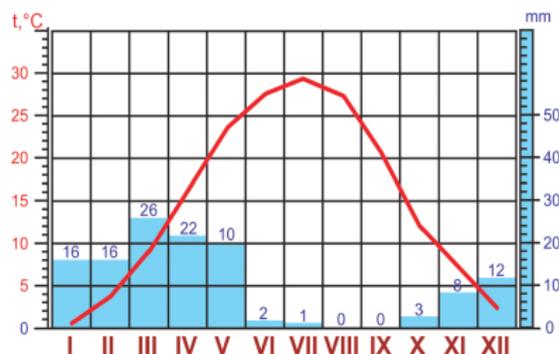


Средняя месячная температура воздуха и количество осадков в Дашогузе

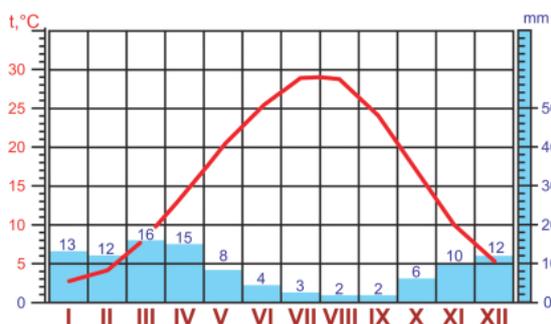


Средняя месячная температура воздуха и количество осадков в Мары

Обширное теплое воздушное течение формируется во всех сезонах кроме летнего, его повторяемость по отношению к другим близка к 1%. В период проникновения этого воздушного течения на территорию нашей страны устанавливается теплая и сухая погода.



Средняя месячная температура и количество осадков в г. Туркменабаде.



Средняя месячная температура воздуха и количество осадков в Туркменбаши

Температура воздуха сохраняется в пределах 10-15°C зимой, 25-30°C – весной и 20-25°C – осенью [2-9,24-33].

Воздушное течение, идущее с северо-запада на нашу территорию, проникает через Западный Казахстан и Устюрт. В связи с поступлением сюда влажных полярных и арктических воздушных масс зимой температура воздуха снижается до минус 10-15°C. Повышается скорость ветра и погода становится пасмурной. В этой связи весной и зимой наступают ранние и поздние заморозки. Это воздушное течение дает около 18 процентов атмосферных осадков, выпадающих в течение года.

Северное холодное воздушное течение проникает в отдельные районы Туркменистана через Уральские горы, Западной Сибирской равнины и Казахстан. Под влиянием континентальных арктических и континентальных полярных воздушных масс возрастает число морозных дней и дней с сухой погодой. Такая синоптическая обстановка способствует выпадению снега и в некоторых случаях снижению температуры воздуха до минус 20-30° С.

Волнообразное движение возникает в результате столкновения холодных и теплых воздушных течений малого объема. В большинстве случаев этот процесс часто повторяется в горных регионах. Волнообразное движение в Копетдаге даёт 15 процентов годового количества осадков.

Медленно идущий циклон на севере Центральной Азии действует во все сезоны года. В этих условиях на территорию Туркменистана проникает полярное воздушное течение, способствуя проявлению морозных дней зимой. В остальных сезонах года в пустыне Каракумы сохраняется повышенная температура воздуха.

Сибирский антициклон в Туркменистане приносит зимой ясную, морозную пого-

ду, а летом – сухую, жаркую погоду. В период проникновения этого антициклона количество атмосферных осадков резко уменьшается, а и преобладающие ветры дуют с восточной и юго-восточной сторон.

Западное воздушное течение на территорию Туркменистана проникает в виде влажных атлантических воздушных масс. Зимой, в результате влияния этого течения погода, становится мягкой, летом же температура воздуха сохраняется в пределах 25-30°C. В это время выпадает 31% атмосферных осадков.

Термическая депрессия формируется на территории Северной Индии, Афганистана и Ирана. Она появляется летом и отличается засушливостью, высокой температурой воздуха (40-45°C) и пасмурной погодой. Дуют также горячие суховеи.

В результате проникновения в Туркменистан воздушных масс различных видов, формируются синоптические процессы со своеобразной температурой воздуха и степенью (уровнем) увлажнения. В Копетдаге 55,3% годового количества выпадающих атмосферных осадков дают холодные (северо-западные, северные, западные) воздушные течения, 17,1 процента – южные циклоны (южные Каспийский и Мургабский, верхний Амударьинский циклоны) 14,8% – волнообразное движение и 12,7% – другие синоптические процессы [1,2,24,31-33].

Континентальность – одна из особенностей климата Туркменистана. Степень континентальности климата определяется в сравнении с температурой города Верхоянска в Якутии.

В Туркменистане степень континентальности климата различна в разных районах. Она равна 46 процентам в г. Эсенгулы, 48% в г. Туркменбаши, 57% в г. Ашхабаде, 61% в пос. Репетек, 62% в г. Дашогузе и 39% в горной зоне (Хайрабад, 2028 м над уровнем моря). В то же время степень континентальности в г. Верхоянске равна 100%.

Как видно из вышеприведенных данных, значительное потепление климата заметно ощущается на морском побережье и в горной местности, а возрастание континентальности в пустынных местностях, то есть летом формируется очень высокая, а зимой весьма низкая температура воздуха.

**Повторяемость направление ветров в Туркменистане.** Горы Копет-Дага также являются как бы барьером, изменяющим направление ветров (рис. 2).

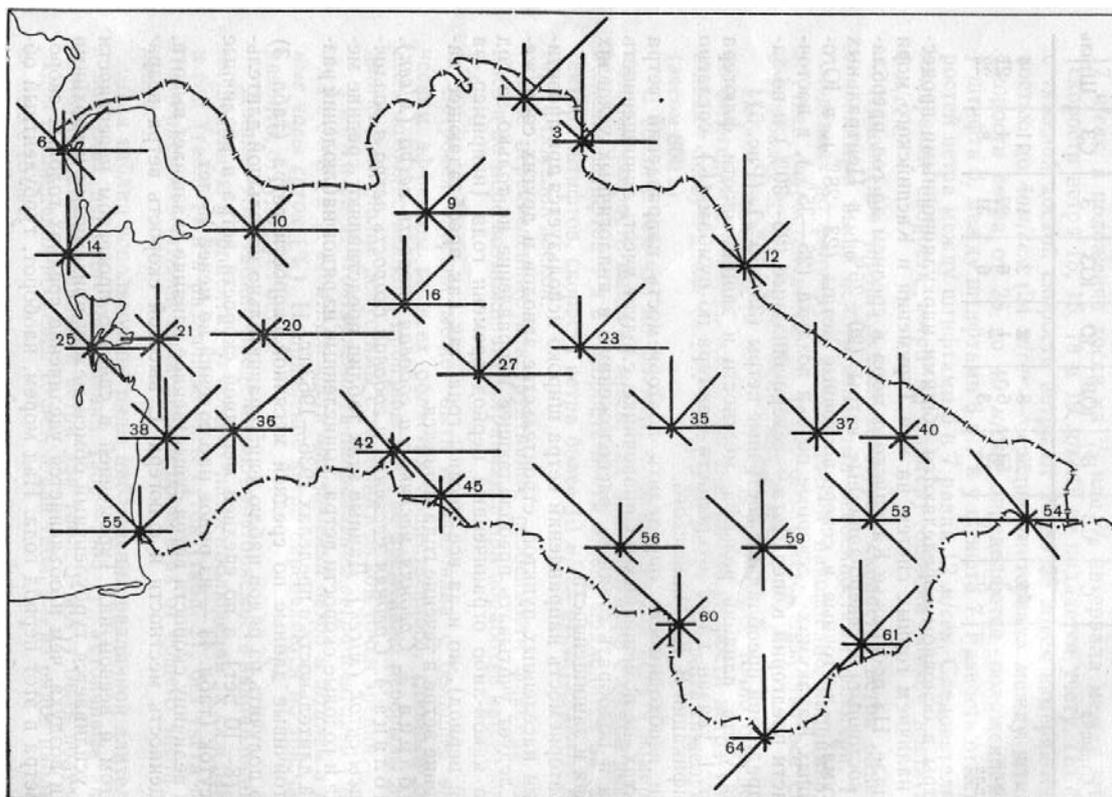


Рис. 2. Повторяемость направление ветров в Туркменистане

Так северо-восточные ветры над Центральными Каракумами, приближаясь к горам Копет-Дага меняют направление на восточное, а северные и западные переходят в северо-западные. Таким образом, потоки, обтекая хребет, приобретают направление, параллельное хребту. Число восточных ветров по западной части предгорий Копет-Дага возрастает за счет того, что при общих северных потоках над Центральными Каракумами обтекание хребта происходит здесь с западной стороны. При этом воздух устремляется в довольно узкий проход между хребтами Большим Балханом и Малым Балханом (ст. Айдин) и обуславливает здесь усиление северо-восточных, восточных ветров часто до штормовых. Воздух, поступающий к предгорьям из восточной половины Центральных Каракумов, принимает здесь северо-западное направление смещения (параллельно хребту) и обтекает хребет с востока.

В теплую часть года Туркменистан находится преимущественно под воздействием термической депрессии с центром над Таджикистаном. В Центральных Каракумах наблюдаются преимущественно северные и северо-восточные ветры (повторяе-

мость 25–35%). В Юго-восточных Каракумах северо-восточные потоки, обтекая горы Ак-Тау и Гиссарский хребет, приобретают северное и северо-западное направление (повторяемость 50–60%). Северо-восточные и северные потоки воздуха в Центральных Каракумах, обтекая предгорья Копет-Дага, деформируются на участке Бахарлы–Серахс в северо-западные, а на участке Сердар–Айдин в восточные потоки. На побережье Каспийского моря летом преобладают северные, северо-западные ветры (повторяемость 30–40%), дующие с относительно холодного моря на прогретую сушу (муссонный тип циркуляции) (рис. 1,2). Этот район характеризуется суточной сменой ветров по типу бризовой циркуляции: днем дует прохладный ветер с моря, а ночью – с суши на море (рис. 3, табл. 1) [2].

В горах Копет-Дага, Парапамиза развита горно-долинная циркуляция: днем ветер дует с долины на гору, а ночью – с гор в долину (таблица 2).

По предгорьям Копет-Дага преимущественно в холодный период года наблюдаются теплые ветры с гор – фёны, связанные с выходом циклонов с юга.

Таблица 1

Суточная характеристика смены ветров по времени

Станция	Часы	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	Штиль
Туркменбаши, пригород	1	54	10	13	4	1	2	3	13	23
	7	31	15	20	14	4	2	3	11	10
	13	10	2	1	11	21	22	13	20	1
	19	39	5	1	0	1	3	5	46	1
Куули-Маяк	1	39	21	7	1	0.3	3	6	23	11
	7	26	22	11	7	3	4	6	21	10
	13	9	3	1	1	2	17	26	41	0.4
	19	37	5	0	0	0	2	9	47	3

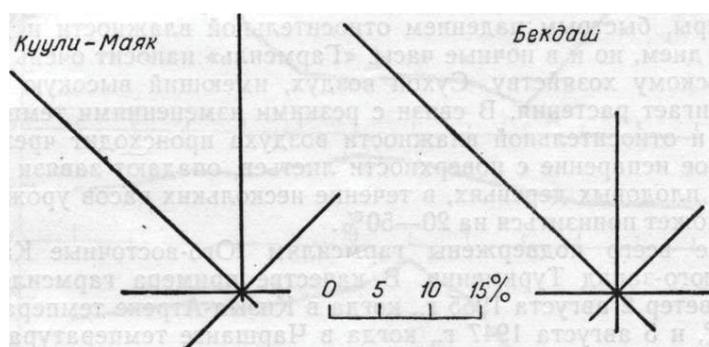


Рис. 3. Розы ветров по побережью Каспийского моря. Июль

Таблица 2

Повторяемость направлений ветра и штилей в различные часы суток в июле в горах, %

Станция	Часы	С	СВ	В	ЮВ	ю	ЮЗ	З	СЗ	Штиль
Хейрабад	1	10	7	9	9	23	29	8	5	16
	7	15	20	36	12	7	3	3	4	12
	13	12	37	35	1	0	1	1	3	0
	19	18	29	45	3	1	0	1	3	3

В качестве примера фёна можно привести ветер, наблюдавшийся 2 января 1942 г., когда на Туркменистан сместился южно-каспийский циклон. В теплый сектор циклона поступал континентальный тропический воздух из Ирана. Теплый фронт через Ашха-

бад прошел около 19 час., когда температура воздуха была 4.4°; к двум часам ночи скорости ветер достигает к полудню. Ниже приведены средние значения суточных колебаний скорости ветра, полученные из ежедневных наблюдений в Ашхабаде, пригороде:

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	Год
Суточная амплитуда (м/сек)	1.7	2.5	2.7	2.1	2.7	2.3	2.5	2.6	2.4	2.4	2.1	1.5	2.0

Для решения многих практических задач, в особенности при учете ветроэнергетических ресурсов, необходимы данные о вероятности различных скоростей ветра и о скоростях ветра различных градаций по румбам. Вероятности различных скоростей ветра, приведенные в таблицах 5 и 6, указывают на преобладание по всей территории Туркмении слабых и умеренных ветров от 0 до 5 м/сек, повторяемость их 75–85% всех возможных скоростей. Лишь на побережье Каспийского моря в дневное время, а летом днем и вечером и на северных склонах Копет-Дага на высотах более 1500 м зимой в ночное время преобладают скорости около 6–9 м/сек (ст. Кара-Богаз-Гол).

Вероятность скоростей ветра более 10 м/сек по побережью Каспийского моря 20–25% зимой и 8–13% летом. В горах зимой ветры более 10 м/сек так же часты, как и на побережье Каспия, но летом их вероятность уменьшается до 1–2%.

Скорость ветра более 20 м/сек отмечена в единичных случаях. Однако следует иметь в виду, что за рассмотренный период наблюдения велись в основном по флюгеру с легкой доской, когда скорости ветра более 20 м/сек могли быть отмечены как 20 м/сек. Кроме того, наблюдения проводились только четыре раза в сутки, поэтому отсутствуют случаи сильного ветра, который мог быть между сроками наблюдений. При анализе больших скоростей ветра следует учитывать также и тот факт, что при наблюде-

ниях по флюгеру скорость ветра отмечается средняя за 2 мин., отдельные порывы в обработку не вошли [2,24].

Число дней с ветром более 15 м/сек в Центральных Каракумах составляет в среднем 5–10, в Юго-восточных Каракумах – 3–8, увеличиваясь на побережье Каспийского моря до 40 в году. Наибольшее число дней с ветром более 15 м/сек наблюдается в долине Амударьи, в районе ст. Чаршанга и достигает 54, а в отдельные годы 85 (1940 г.). В годовом ходе дни с сильным ветром преобладают в зимнее и особенно в весеннее время – в период интенсивной циклонической деятельности над рассматриваемой территорией. Исключением являются верховья рек Теджена, Мургаба и его притока Кушки, где дни с сильным ветром чаще всего наблюдаются летом. Вероятность ветра различной скорости по направлению в общих чертах подтверждает описанные выше закономерности. При всех направлениях ветра чаще всего наблюдаются небольшие скорости ветра, в пределах 2–5 м/сек.

С целью учета местоположения станции и степени защищенности флюгера использована классификация В.Ю. Милевского. Чем больше цифра класса открытости, тем меньше защищенность флюгера и тем больше регистрируемая на данной станции скорость ветра. Согласно этой классификации, для каждой станции определена открытость флюгера (К) по восьми румбам, представленная в таблице 3.

Таблица 3

Коэффициенты  $K_o$ , относительная единица и среднегодовые скорости ( $V_n$ ), м/с, по классификации Милевского

Степень открытости флюгера	Форма рельефа					
	А		б		в	
	Выпуклая		плоская		вогнутая	
	$K_o$	$\langle V_n \rangle$	$K_o$	$\langle V_n \rangle$	$K_o$	$\langle V_n \rangle$
Открытое побережье около водных поверхностей:						
- океана или открытого (внешнего) моря	12	7.0	11	5.5	10	4.3
- закрытого (внутреннего) моря	11	5.2	10	4.3	9	4.9
- залива или большого озера	10	4.6	9	4.7	8	3.1
- большой реки	9	3.6	8	3.2	7	2.7
Вдали от водных поверхностей. Флюгер выше элементов защищенности:						
- нет никаких элементов защищенности	8	4.1	7	3.6	6	2.9
- отдельные элементы защищенности	7	3.6	6	3.4	5	2.5
- сплошные элементы защищенности	6	3.3	5	2.9	4	2.1
Флюгер ниже элементов защищенности:						
- сплошные элементы защищенности	4	2.7	4	2.5	4	2.2

Примечание: элементами защищенности могут являться холмы, строения, деревья, причем они принимаются во внимание, если расстояние от них до флюгера меньше 20-кратной их высоты.

Кроме открытости флюгера по румбам, определен класс открытости станции в целом с учетом преобладающих форм рельефа, оказывающих влияние на ветровой поток.

Сопоставление класса открытости станции и средней скорости ветра подтверждает решающее влияние ландшафтных условий на показания флюгера, о чем подробно приведены в таблицах 3 и 4 [18-24].

На станциях, расположенных на открытых возвышенностях, на водоразделах, в верхних частях склонов скорость ветра заметно увеличивается, достигая в среднем 4–6 м/сек за год. В местах с полузащищенной установкой флюгера, находящихся преимущественно на ровном месте, средние годовые скорости ветра несколько меньше – в пределах 3–4 м/сек (ст. Шахсенем, Екедже). В пунктах, расположенных в долинах, окруженных горами, в нижних частях склонов среди построек или древесных насаждений, в условиях сильной защищенности флюгера, средние годовые скорости ветра составляют 1.6–2.1 м/сек (Фирюза, Бахарден, Кара-Кала) [2-6, 18-22, 28-33].

**Ветроэнергетический кадастр.** Для систематизации характеристик ветровой обстановки в конкретном регионе с целью ее эффективного энергетического использования, как правило, разрабатывается ветроэнергетический кадастр, представляющий собой совокупность аэрологических и энергетических характеристик ветра, позволяющих определить его энергетическую ценность, а также целесообразные параметры и режимы работы ветроэнергетических установок.

Основными характеристиками ветроэнергетического кадастра являются:

- среднегодовая скорость ветра, годовой и суточный ход ветра;
- повторяемость скоростей, типы и параметры функций распределения скоростей;
- максимальная скорость ветра;
- распределение ветровых периодов и периодов энергетических затиший по длительности;
- удельная мощность и удельная энергия ветра;
- ветроэнергетические ресурсы региона.

Начиная с 50-х гг. прошлого столетия в Туркменистане, были развернуты широкие работы по созданию ветроэнергетических кадастров [18-22] хотя при этом северные и восточные районы страны фактически не рассматривались. Основным источником

исходных данных для разработки ветроэнергетического кадастра является по единой методике с фиксированной классификацией мест наблюдения по степени их открытости и охватывают периоды в десятки лет.

За последние 20-30 лет произошло качественное изменение уровня этих наблюдений. С помощью изменений на высотных метеорологических и телевизионных мачтах полученные сведения о вертикальном профиле скоростей в приземном слое высотой до 500 м. Увеличивалась частота регулярного получения информации о скорости и направлении ветра на опорной сети метеорологических станций (с 4 до 8 раз в сутки), а некоторыми метеостанциями и отдельными заинтересованными организациями ведутся непрерывные наблюдения в автоматическом режиме. Эти измерения по длительности, как правило, уступают многолетним наблюдениям гидрометеослужбы, но они особенно важны при измерении быстропеременных процессов, включая порывы ветра и его максимальные пульсации, а также при оценке рабочих периодов и периодов простоя ветроустановок [5, 6, 18-28].

**Средние скорости ветра.** Основной характер ветра, определяющий его интенсивность и эффективность использования ветровой энергии, является его средняя скорость за определенный период времени, например, за сутки, месяц, год или несколько лет. Средняя скорость ветра представляется как среднеарифметическое значение, полученное из ряда замеров скорости, сделанных через равные интервалы времени в течение заданного периода. Если обозначить как  $V_{ijkl}$  случайное значение скорости, полученное в момент времени, определяющийся следующим набором параметров:  $i$ -порядковый номер года,  $j$ -порядковый номер месяца,  $k$ -порядковый номер суток,  $l$ -порядковый номер измерения в сутках, то, например, усреднение скорости по всем значениям  $l$  ( $l = 1, 2, \dots, L$ ) дает среднесуточное значение скорости в  $i$ -м году,  $j$ -м месяце,  $k$ -х сутках:

$$\langle V \rangle_{ijk} = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L V_{ijkl} \quad (1).$$

По этой формуле можно производить усреднение скорости по любому другому параметру  $i, j, k$ , или сразу по любой их комбинации и получать соответствующие средние скорости, например, среднемесячные,

среднегодовые, среднемноголетние и определенный месяц и т.д. В дальнейшем, если нет необходимости конкретизировать временной момент измерения, будем обозначать полное число всех учитываемых измерений как  $n$ , порядковый номер измерения как  $i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) и соответствующее случайное значение скорости как  $v_i$ , так что общая формула для определения всех искомым средних значений скорости приобретает вид

$$\langle V \rangle = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n v_i \quad (2).$$

Для получения достоверных данных о средних скоростях ветра, определяющих его энергетическую способность, возникает вопрос о репрезентативности, представительности выборки случайных значений скорости, т. е. О необходимом объеме и длительности измерений. В общем случае с увеличением объема получаемых данных точность и достоверность вычисляемых средних значений повышаются. Для численной оценки используется коэффициент вариации средних скоростей, которых определяется выражением

$$C_v = \frac{S_v}{\langle v \rangle} \quad (3),$$

где  $S_v$  – среднее квадратичное отклонение (разброс) соответствующей средней скорости. Коэффициент вариации средних скоростей обычно падает при увеличении периода усреднения, т. е., например, среднемноголетняя скорость имеет меньший разброс, чем многолетняя среднемесячная скорость.

При приведенных в данных по хронологическим изменениям среднегодовых скоростей ветра на метеостанция побережья Каспийского моря следует, что для определения средней многолетней скорости ветра и выявления вариаций среднегодовой скорости от года к году достаточно ограничиться рассмотрением 10-летних объемов выработки наблюдений. Если использование 5-летних объемов выработки давало отклонение в средней скорости 5-7%, то рост длительности выработки с 10 до 15-20 лет существенного влияния не оказывает и способствует уточнению не более чем на 2-3%. Значение коэффициента вариации длительностью 8-12 лет. В [18-20] представлены также результаты обработки 10-летних объемов наблюдений по 47 метеостанция Тур-

кменистана, из которых следует, что среднеквадратичное отклонение среднегодовой скорости повсеместно примерно одинаково и составляет в большинстве случаев 0.2-0.5 м/с. Коэффициент вариации среднегодовых скоростей ветра в прибрежных районах значительно ниже, чем в районах, удаленных от береговой линии. На открытом побережье Каспийского моря он составляет в среднем 5.2%, в глубине заливов Каспийского моря и на побережье Каспийского моря – в среднем 6.3%, а внутриматериковых пунктах он увеличивается до 7.7%.

**Технология создания ГИС на базе графической среды.** В области создания ГИС от ввода картографической информации в компьютер до разработки сопутствующих баз данных и формирования информационной среды.

ГИС базируются на гибридной растрово-векторной технологии, совмещающей растровую топооснову и векторные слои, что позволяет в каждом конкретном случае найти оптимальное соотношение между стоимостью и сроками создания ГИС с одной стороны, и объемом решаемых задач с другой. Окончательная сборка растрово-векторных составляющих производится в графической среде.

ГИС технология, обладающая высокой степенью открытости, позволяет применять для ввода графической информации различные внешние графические редакторы (FreeHand, CorelDraw, AutoCAD и др.) и предоставляет на любом этапе (в том числе и после сдачи в эксплуатацию) возможность расширения набора аналитических функций ГИС за счет усиления ее векторной составляющей.

Начав с векторизации ограниченного числа первоочередных слоев, заказчик в кратчайшие сроки и с минимальными затратами получает работающую ГИС. Далее, по мере появления новых задач, можно переводить в векторное представление дополнительные слои из растровой топоосновы или наносить новые слои, отсутствующие в ней, а также подключать к формируемой информационной системе новые задачи и базы данных [4-12, 23-25, 35].

### 3. Основные этапы создания ГИС карты ветропотенциала Туркменистана

Математические операции и расчеты ветропотенциала для создания ГИС технологической карты.

**Зависимость средней скорости ветра от высоты.** При установившемся ветром потоке скорость ветра возрастает с увеличением высоты над поверхностью Земли. Обычно регистрирующие приборы на метеостанциях располагаются на высотах 9-20 м. В то же время оси современных ветроэнергетических установок могут находиться на различных высотах в приземном слое толщиной ~100 м; имеются даже предложения о размещении ветроэлектрических установок на аэростатах. Поэтому для оценки эффективности использования ветрового потока необходимо установление вертикального профиля скоростей ветра.

Теоретическое исследование обтекания плоской ровной поверхности стационарным потоком газа дает следующую зависимость скорости в потоке на высоте  $h$  от поверхности [18]:

$$v(h) = a \cdot (\ln h - \ln h_0) \quad (4),$$

где  $a$  – постоянная, определяющая общую интенсивность потока;  $h_0$  – величина, определяющая масштаб шероховатости поверхности, причем эта формула пригодна при условии  $h \gg h_0$ . С другой стороны, стремление  $v(h)$  к бесконечности при  $h \rightarrow \infty$  есть следствие использование использованного в теории приближения бесконечного размера обтекаемой поверхности.

Таким образом, получаем соотношение для скоростей на высотах  $h_1$  и  $h_2$ , из которого, в частности, следует, что при уменьшении шероховатости поверхности проолифь скоростей становится менее резким.

$$v(h_1) = v(h_2) \frac{(\ln h_1 - \ln h_0)}{(\ln h_2 - \ln h_0)} \quad (5).$$

Т а б л и ц а 4

Коэффициент возрастания средней скорости ветра с высотой\*  $v(h_2)/v(h_1)$  и показатель степени  $m$

Сезон	Высота, м						m
	10	20	40	60	80	100	
Зима	1	1.12	1.26	1.35	1.43	1.50	0.17
Весна	1	1.17	1.36	1.50	1.59	1.66	0.22
Лето	1	1.18	1.40	1.55	1.67	1.76	0.24
Осень	1	1.12	1.26	1.35	1.43	1.50	0.17
Год	1	1.15	1.32	1.44	1.53	1.60	0.20

\*Для побережий озер и морей, а также верхних частей склонов десятичные знаки коэффициента следует уменьшить в 1.5 раза.

Другое, часто используемое, выражение для вертикального профиля скоростей представляется эмпирической зависимостью степенного вида [18-22,29]:

$$v(h_1) = v(h_2) \cdot \left( \frac{h_1}{h_2} \right)^m \quad (6).$$

В отечественных исследованиях 50–60-х гг. при расчете вертикального профиля среднегодовых значений скоростей ( $v(h_1)$  и ( $v(h_2)$ )) показатель степени  $m$  принимался равным 0.2, а при составлении атласа ветровой энергии США принималось значение  $m = 1/7$ .

Последующие исследования выявили наличие зависимости показателя степени для средних скорости от времени года. В таблице 4 приведены отношения средних скоростей на различных высотах к средней скорости на высоте 10 м и значения показателя  $m$  для различных сезонов года, справедливые для условий равнинной местности: степь, горы, пустыня [18-24,29].

Наличие теоретической зависимости (4) с вполне физически ясным параметром масштаба шероховатости земной поверхности  $h_0$  позволяет объяснить показанное в таблице 4 сезонное изменение эмпирического параметра  $m$ , а также его уменьшение для побережий озер и морей.

Действительно, зимой и осенью из-за наличия снежного покрова и увеличения влажности почвы от дождей размер шероховатости земной поверхности меньше, чем весной и летом, когда почва просыхает и на ней появляются неровности и растительный покров, задерживающий ветер. Поскольку с уменьшением размера шероховатости уменьшается крутизна вертикального профиля скоростей, то это соответствует уменьшению параметра  $m$ . Аналогично для побережий, из-за гладкости поверхности озер и морей, масштаб шероховатости значительно меньше, чем для удаленных от них участков земли, и соответственно меньше значение  $m$ . Влияние шероховатости земной поверхности на вертикальный профиль скоростей детально изучалось в зарубежных работах, в том числе и с использованием выражения (4), причем созданы довольно полные таблицы профилей в зависимости от характеристик поверхности и ее сопротивления ветру. В отечественной литературе связь параметров ветра с шероховатостью земной поверхности исследовалась мало [24-30].

В то же время было выяснено, что показатель  $m$  является не только функцией времени, географических и климатических условий местности, но и довольно резкой функцией самой скорости. В таблице 5 представлена среднестатистическая зависимость показателя  $m$  от скорости ветра  $v$ , м/с, рекомендуемая авторами для использования в расчетах.

Таблица 5

Среднестатистическая зависимость показателя  $m$  от скорости ветра  $v$ , м/с

$v$ , м/с	1.5	3.5	5.5	7.5	9.5	11.5	13.5
	15.5	17.5	20.5	24.5	28.5	34.5	>40
$m(v)$	0.42	0.31	0.25	0.21	0.18	0.16	0.15
	0.14	0.13	0.13	0.13	0.12	0.12	0.12

Таким образом, выражение (5), будучи простым, по формуле, в действительности представляет весьма сложную и неявную зависимость скорости от высоты. Кроме того, для неоднородного рельефа показатель  $m$  оказывается различным для различных направлений (румбов), так что проведения достаточно точных расчетов требуется определение эмпирических значений  $m$  как комбинаций значений по отдельным румбам.

**Временная зависимость средней скорости ветра.** Помимо представленного выше закономерного изменения параметра случайной величины – средней скорости ветра в зависимости от открытости местности и высоты над поверхностью Земли существует также закономерное временное изменение средней скорости ветра, обусловленное определенным и довольно устойчивым характером изменения погодных и климатических условий в течение года. Примером является отмеченное в предыдущем разделе сезонное изменение показателя  $m$  вертикального профиля скорости ветра.

Важными составляющими ветроэнергетического кадастра являются нижеследующие временные характеристики скорости ветра [5,18,30].

Суточный ход средней скорости ветра – это изменение скорости ветра в течение суток, усредненное по всем суткам в определенном месяце и по многолетним наблюдениям. Согласно представленному выше определению, среднегодовое значение скорости ветра в один и тот же  $l$ -й момент (час) измерения для всех суток в  $j$ -м месяце  $\langle v \rangle_{jl}$  равно

$$\langle v \rangle_j = \frac{1}{I \cdot K} \sum_{i=1}^I \sum_{k=1}^K V_{ijkl} \quad (7),$$

где  $K$  – число дней в месяце,  $I$  – число лет наблюдений. Таким образом суточный ход средней скорости ветра представляет зависимость  $\langle v \rangle_{jl}$  от момента измерения  $l$ , часа, для определенного  $j$ -го месяца.

Годовой ход средней скорости ветра – это изменение в течение года многолетней среднемесячной скорости ветра, которая в соответствии с определением (1) для  $j$ -го месяца равна  $\langle v \rangle_j$ :

$$\langle v \rangle_j = \frac{1}{I} \sum_{i=1}^I \langle v \rangle_{ij} \quad (8),$$

где  $\langle v \rangle_{ij}$  – средняя скорость в месяце  $j$  года  $i$ :

$$\langle v \rangle_j = \frac{1}{K \cdot L} \sum_{k=1}^K \sum_{l=1}^L \langle v \rangle_{ijkl} \quad (9),$$

где  $L$  – число измерений в течение дня. Таким образом, годовой ход средней скорости ветра представляет зависимость  $\langle v \rangle_j$  от порядкового номера  $j$  месяца в году. Рассмотренные характеристики временной зависимости средней скорости ветра имеют важное значение для оценки не только ветроэнергетического потенциала определенной местности, но эффективности его использования за счет учета степени согласованности графика поступления ветровой энергии с графиком энергетической нагрузки потребителей [5,18-29].

В частности, для северных районов побережья Каспийского моря как суточный, так и годовой ход среднемесячной скорости ветра на высоте 10-11 м, представленные на рисунках 4 и 5, оказываются весьма благоприятными для использования ветроэнергетических установок как автономном режиме, так и в сочетании с гидроэлектрическими установками. Максимум среднемесячных скоростей приходится на холодное время года и совпадает с сезонным пиком потребления тепловой и электрической энергии; одновременно он совпадает с минимумом годового стока рек, т. е. Позволяет компенсировать сезонный дефицит гидроэнергии. Суточное изменение средней скорости значительно проявляется в летнее время, причем скорости в дневные часы в среднем 1-2 м/с выше, чем ночью, что является благоприятным для эффективного использования ветра, поскольку максимум потребления энергии приходится также на дневное время.

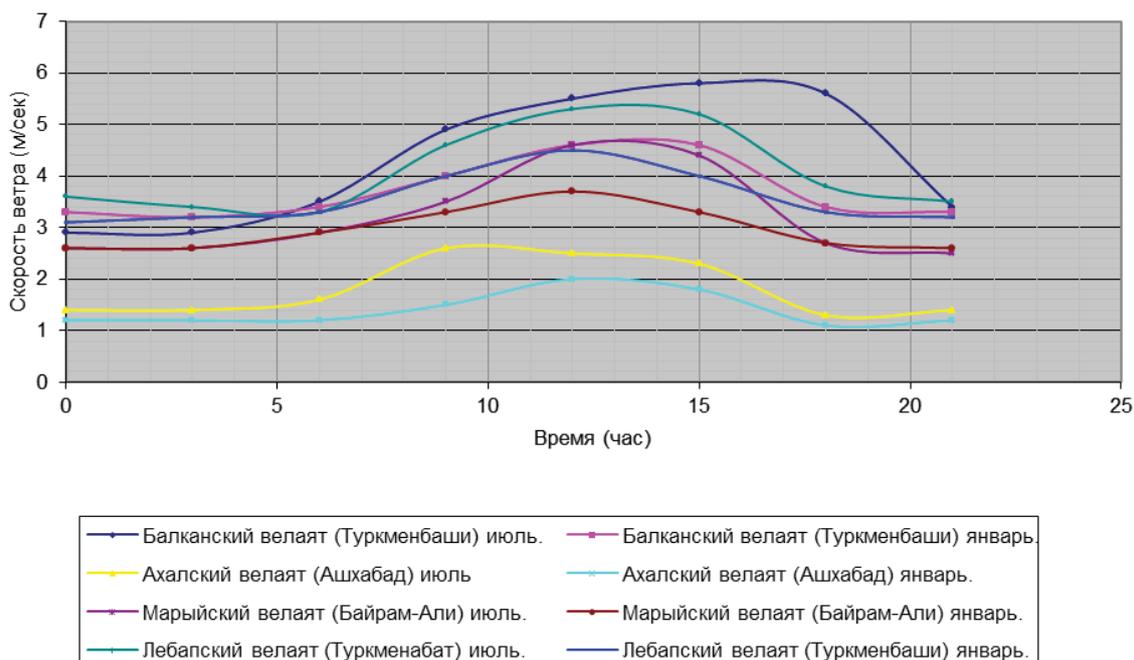


Рис. 4. Средний суточный ход скорости ветра по областям Туркменистана

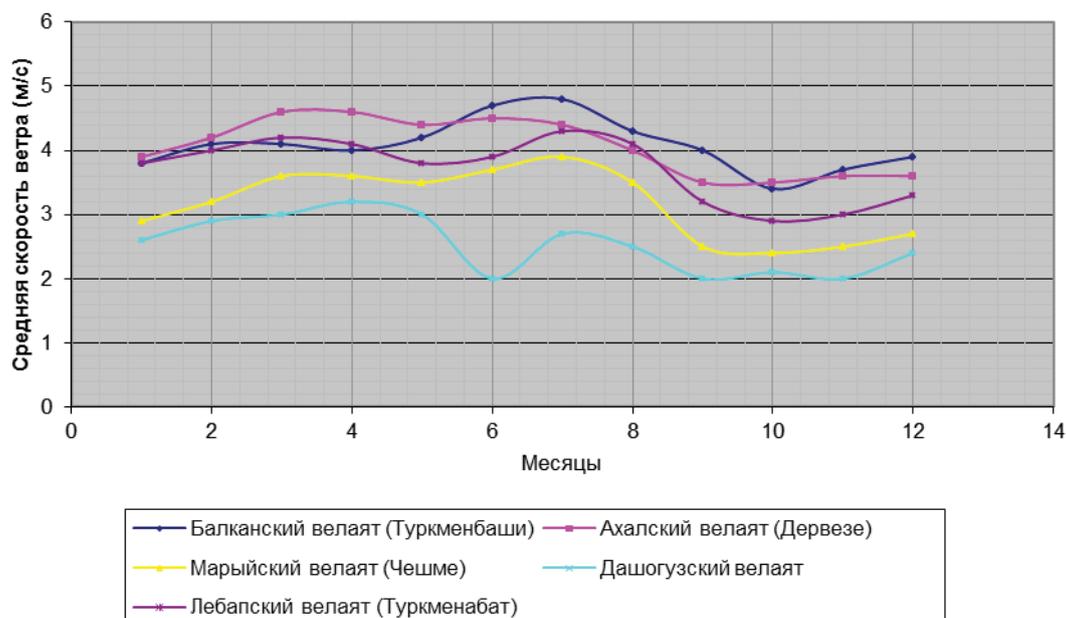


Рис. 5. Годовой ход среднемесячных скоростей ветра и уравнения регрессии по областям Туркменистана:  
 1 – Балканский (Туркменбаши)  $y = -0,024x + 4,242, R^2 = 0,050$ ;  
 2 – Ахалский (Дарваза)  $y = -0,081x + 4,593, R^2 = 0,446$ ;  
 3 – Лебапский (Туркменабат)  $y = -0,093x + 4,325, R^2 = 0,479$ ;  
 4 – Марыйский (Чешме)  $y = -0,077x + 3,671, R^2 = 0,270$ ;  
 5 – Дашогузский (Дашогуз)  $y = -0,081x + 3,065, R^2 = 0,454$ .

Для южных регионов Туркменистана профиль годового хода средней скорости ветра [18] качественно соответствует годовому ходу средней скорости в северных регионах. В таблице 6 приведены данные

по годовому ходу среднемесячных значений скорости ветра на высоте 10 м для побережья Каспийского моря с соответствующими среднегодовыми значениями 3.2 и 4.5 м/с.

Таблица 6

Годовой ход среднемесячной скорости ветра на высоте 10 м для Хазара  $\langle v \rangle_j$ , м/с

	Месяц, j											
	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
$\langle v_r \rangle$	3.9	4.0	4.1	2.7	2.4	2.5	2.9	3.0	3.4	3.5	3.2	3.9
$\langle v_{rc} \rangle$	5.5	5.5	5.8	4.3	3.7	3.5	3.5	3.9	4.4	4.8	4.9	5.5

**Характеристики распределения скорости ветра.** Существует два способа описание характеристик распределения случайной величины, которой в данном случае является скорость ветра на некоторой высоте.

Один их основан на разбиении всей области случайных значений скорости на интервалы  $\Delta v_i$  вблизи значения  $v_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ), которые обычно соответствуют середине соответствующего интервала, непосредственном экспериментальном получении выработки случайных значений скорости и определении повторяемости скорости ветра, т. е. относительной доли  $t_i$  попадания скорости в каждый интервал  $\Delta v_i$ ; она также называется дифференциальной вероятностью появления скорости  $t_i$  при этом соблюдается условие (нормировки)

$$\sum_{i=1}^n t_i = 1 \quad (10).$$

Повторяемость скорости ветра является одной из важнейших характеристик кадастра. Она показывает, какую часть времени в течение рассматриваемого периода ветер имел определенную скорость. Тем самым устанавливается энергетическая ценность ветра, оценивается целесообразность и эффективность его использования.

Оценка средней скорости ветра ( $v$ ) дается выражением:

$$\langle v \rangle = \sum_{i=1}^n v_i \times t_i \quad (11).$$

Аналогично вычисляется среднее значение любой функции скорости.

Интегральная вероятность  $F_i$  определяется как вероятность того, что скорость ветра попадает в  $i$ -й или более высокий интервал скоростей:

$$F_i = \sum_{j=i}^n t_j = 1 - \sum_{j=1}^{i-1} t_j \quad (12).$$

Условие нормировки (1) при этом выразится как  $F_1 = 1$ .

Другой способ описания характеристик скоростей ветра основан на поиске детерминированных модельных функций  $F(v) - f(v)$ , описывающих распределение случайных значений скорости ветра  $v$  в соответствии со следующим связанными определениями:

$F(v)$  – интегральная функция распределения, равная вероятности того, что скорость ветра больше значения  $v$ ;

$f(v) = -dF(v)/dv$  – дифференциальная функция распределения, равная плотности вероятности, т. е. отношению вероятности нахождения скорости в интервале между  $v$  и  $v + dv$  к ширине интервала  $dv$ .

Из этих определений следует неравенство  $f(v) \geq 0$  и условия нормировки функций распределения вероятностей:

$$\begin{aligned} F(0) &= 1; \\ F(\infty) &= 0; \\ \int_0^{\infty} f(v) dv &= F(0) - F(\infty) = 1 \end{aligned} \quad (13-15).$$

Среднее значение или математическое ожидание скорости ветра  $M[v]$  дается выражением:

$$M[v] = \int_0^{\infty} v \times f(v) dv \quad (16).$$

Аналогично рассчитывается среднее значение, или математическое ожидание, любой функции скорости.

В многочисленных исследованиях были предложены различные типы функций распределения скоростей ветра, в том числе табулированные – Поморцева, Гриневича, Гуллена и аналитические – Гриневича, Вейбулла, Рэля. При этом было выявлено, что из простых аналогические распределений скоростей ветра наиболее точные результаты в диапазоне скоростей 4-20 м/с получаются при использовании двухпараметрического распределения Вейбулла, дающегося выражениями:

$$F(v) = e^{-(v/c)^k} \quad (17)$$

$$f(v) = \frac{k}{c} \cdot \left(\frac{v}{c}\right)^{k-1} \cdot e^{-(v/c)^k} \quad (18)$$

где параметр  $c$ , имеющий размерность скорости, характеризует масштаб изменения функции распределения по оси скоростей, а параметр  $k$  характеризует крутизну распределения [5,6,18,21-22,29].

При этом, в частности, математическое ожидание  $s$ -го начального момента скорости  $M[v^s]$  в соответствии с (16) записывается:

$$M[v^s] = c^s \cdot \Gamma\left(1 + \frac{s}{k}\right) \quad (19),$$

где  $\Gamma(x)$  – гамма-функция. С ростом  $k$  уменьшается разброс ожидаемых значений скорости, а ее  $s$ -й начальный момент приближается к значению  $c^s$ .

**Соответствие между экспериментальным распределением скорости и распределением Вейбулла.**

Соответствие между двумя представленными способами описания распределения скоростей ветра может быть установлено различными методами выбора наиболее подходящих параметров  $k$  и  $c$  для измеренных значений  $t_i$  ( $i = 1, \dots, n$ ) выработки случайных значений скорости.

**Метод моментов.** Метод моментов для определения параметров модельной функции распределения  $F(v)$  основывается на условии равенства математических ожиданий моментов скоростей  $M[v^s]$  и соответствующих экспериментальных оценок средних значений моментов скоростей  $\langle v^s \rangle$  по формуле (2) для  $s = 1, 2, \dots$ , что дает систему уравнений:

$$M[v^s] = \sum_{i=1}^n v_i^s \cdot t_i; s = 1, 2, \dots \quad (20).$$

Число этих уравнений принимается равным числу независимых параметров функции распределения  $F(v)$ , что позволяет найти однозначный набор этих параметров. При этом обычно используется уравнения для первых низших моментов скоростей. Для двухпараметрического распределения Вейбулла достаточно использовать два уравнения для первого и второго моментов, которые в соответствии с общим выражением (19) приобретают вид:

$$c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) = \sum_{i=1}^n v_i t_i \quad (21);$$

$$c^2\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) = \sum_{i=1}^n v_i^2 t_i \quad (22).$$

В данном случае уравнения для третьего и более высоких моментов могут служить для оценки ошибки представления экспериментального распределения скоростей модельным двухпараметрическим распределением и одновременно для оценки полноты экспериментальной выборки [5,6,18,21-22,29].

**Графический метод и минимизация ошибки.** Графический метод представляет приближение модельной кривой функции распределения к кривой экспериментальных значений посредством выбора параметров на основе некоего принятого принципа минимизации ошибки приближения. Наиболее удобными для этого метода представляются случаи, когда с помощью изменения масштабов по осям параметра распределения и функции распределения удастся свести ожидаемую зависимость к прямой линии [5,6,18,21-22,29].

Функции Вейбулла соответствует этим случаям. Действительно, прологарифмировав дважды обе части выражения (17), получаем следующее уравнение:

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{F(v)}\right)\right) = k(\ln v - \ln c) \quad (23),$$

представляющее линейную зависимость функции распределения скоростей ветра вида  $\ln \ln[1/f(v)]$  от  $\ln v$  с коэффициентом наклона  $k$  и постоянным членом, зависящим от параметра  $c$ . Соответствующая ей экспериментальная зависимость представляется значениями величины

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{F_i}\right)\right) = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{\sum_j t_j}\right)\right) \quad (24),$$

в точках  $\ln v_{iM}$ , причем, в соотношении с определением (14), в качестве  $v_{iM}$  следует брать минимальное значение скорости в  $i$ -м интервале

$$v_{iM} = \sum_{j=1}^{i-1} \Delta v_j \quad (25).$$

Нанесение зависимости (24), (25) в виде графика в некоторых случаях позволяет достаточно точно приблизить его прямой линией и определить искомые параметры  $k$  и  $c$ .

Существует и более объективная процедура определения параметров  $k$  и  $c$ , которая состоит в использовании некоторого принципа минимизации ошибки представления, в частности, известного «метода наименьших квадратов», включающего минимизацию суммы квадратов отклонений значений модельной функции от экспериментальных значений:

$$S = \sum_{i=1}^n [ \ln(\ln(\frac{1}{F_i})) - k \cdot (\ln v_{iM} - \ln c) ]^2 \quad (26).$$

При этом могут возникнуть варианты методики расчета.

*Вариант 1.* Если параметры  $k$  и  $c$  считать независимыми, то уравнения для их определения запишутся в виде условий минимальности величины  $S$  как функции этих параметров:

$$\begin{aligned} \frac{dS}{dk} &= 0, \\ \frac{dS}{dc} &= 0, \end{aligned} \quad (27, 28),$$

что приводит к следующей системе уравнений (29), (30):

$$\sum_{i=1}^n [ \ln(\ln(\frac{1}{F_i})) - k \cdot (\ln v_{iM} - \ln c) ] \cdot \ln v_{iM} = 0,$$

$$\sum_{i=1}^n [ \ln(\ln(\frac{1}{F_i})) - k \cdot (\ln v_{iM} - \ln c) ] = 0 \quad (30).$$

*Вариант 2.* Если исходить из обычно используемого требования равенства математического ожидания скорости  $M[v]$  оценке средней скорости по выборке  $\langle v \rangle$ , т. е. выполнения соотношения (21), то величина  $S$  приобретает выражение

$$\begin{aligned} S = \sum_{i=1}^n [ \ln(\ln(\frac{1}{F_i})) - k \cdot \ln(\frac{v_{iM}}{\langle v \rangle}) - \\ - k \cdot \ln(\frac{v_{iM}}{\langle v \rangle}) - k \cdot \ln(\Gamma(1 + \frac{2}{k})) ]^2 \quad (31), \end{aligned}$$

и сохраняющееся единственное условие минимума (27) дает уравнение для определения  $k$ .

Соответствие, или адекватность, представления реального распределения скорости  $t_i$  на интервалах  $\Delta v_i$  аналитической функцией Вейбулла  $f(v)$  определяется величиной  $S$  или среднеквадратичного отклонения  $\sigma$ , равного

$$\sigma = \sqrt{\sum_{i=1}^n [ f(v_i) \cdot \Delta v_i - t_i ]^2} \quad (32),$$

причем удовлетворительное соответствие для Туркменистана обычно принимается как условие  $\sigma < 0.06$  [5,6,18,21-22,29].

**Построение функции распределения скорости ветра на различных высотах над поверхностью Земли.**

Приведенное в предыдущем разделе рассмотрение распределения скорости ветра относится к высоте флюгера, на которой осуществляются методические измерения скорости ветра. Высота флюгера на метеостанциях может быть различной и обычно находится в пределах 9-20 м. В то же время для оценки ветроэнергетической ценности какой-либо местности необходимо знание ветровой обстановки на различных высотах в приземном слое толщиной примерно 100 м, который в настоящее время интенсивно осваивается с целью использования ветроэнергетических установок. К тому же, как было отмечено выше, показания скорости сильно зависят от открытости местности и защищенности флюгера по различным направлениям ветра. В связи с этим возникает задача построения распределения скоростей ветра для заданной местности и заданной высоты над поверхностью Земли по измеренным значениям скорости на метеостанции с определенными географическими условиями и определенной высотой флюгера.

Решение этой задачи основано на представленных выше зависимостях скорости ветра от классов открытости местности и флюгера  $K_o, K_\phi$  и от высоты  $h$  [5,6,18,21-22,29].

**Восстановление экспериментального распределения скорости.** Метод восстановления экспериментального распределения скоростей, полученного на флюгере с высотой  $h_\phi$  включает пересчет каждого измеренного значения скорости  $v_i(h_\phi)$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ) к значению  $v_i(h)$  по формуле:

$$v_i(h) = \left( \frac{K_o}{K_\phi} \right) \cdot \left( \frac{h}{h_\phi} \right)^m \cdot v_i(h_\phi) \quad (33)$$

При этом показатель  $m$ , зависящий от скорости  $v_i(h_\phi)$ , строго говоря, должен определяться эмпирически для данной местности. Для приближенных оценок можно воспользоваться усредненной зависимостью, представленной в таблице 5.

После пересчета всех  $n$  измеренных значений скорости находятся новые значения повторяемости скорости  $t_i(h)$ , соответствующие интервалам  $\Delta v_i$  вблизи значения  $v_i(h)$ .

Построенное таким образом распределение скоростей может быть использовано, в соответствии в приведенном выше разделе, для оценки характеристик скорости на заданной высоте  $h$ , а также для восстановления аналитического распределения скоростей, что дает новую плотность распределения  $g[v(h)]$ .

**Восстановление аналогического распределения скорости ветра по ее среднему значению.** Поскольку скорости ветра на различных высотах связаны сложной нелинейной зависимостью (показатель  $m$  зависит от скорости), то аналитическое распределение скорости ветра на высоте  $h$  будет представляться дифференциальной функцией  $g[v(h)]$ , принципиально отличной от рассмотренной выше дифференциальной функции распределения скоростей на высоте флюгере  $f[v(h_\phi)]$ , поскольку должно соблюдаться дифференциальное соотношение

$$g[v(h)] \cdot dv(h) = f[v(h_\phi)] \cdot dv(h_\phi) \quad (34),$$

где  $dv$  – дифференциал скорости. И только если  $v(h)$  оказывается пропорциональной  $v(h_\phi)$ , функции  $g(v)$  и  $f(v)$  совпадают (с точностью до постоянного множителя) [5,6,18,21-22,29].

Интегральная функция распределения  $\Phi[v(h)]$  в любом случае выражается через введенную ранее функцию  $F[v]$  посредством соотношения

$$\Phi(v) = F\left(\frac{K_\phi}{K_o} \cdot \left(\frac{h_\phi}{h}\right)^m \cdot v\right) \quad (35),$$

где  $m$  – функция скорости  $v$ .

Однако в практических приближенных расчетах распределения скоростей часто принимается, что показатель  $m$  является постоянным в области существенных значений скоростей, так что дифференциальная функция распределения скоростей на высоте  $h$  оказывается равной

$$g[v(h)] = \beta \cdot f[\beta \cdot v(h)] \quad (36),$$

а интегральная функция распределения равна

$$\Phi[v(h)] = F[\beta \cdot v(h)] \quad (37),$$

здесь постоянная  $\beta$  равна

$$\beta = \frac{K_\phi}{K_o} \cdot \left(\frac{h_\phi}{h}\right)^m \quad (38),$$

где фиксированное значение  $m$  соответствует средней скорости  $\langle v(h_\phi) \rangle$ .

Распределение (36), (37) дает следующее значение математического ожидания  $s$ -го начального момента скорости:

$$\begin{aligned} M[v(h)^s] &= \int_0^\infty v(h)^s \cdot g[v(h)] \cdot dv(h) = \\ &= (c \cdot \beta)^s \cdot \Gamma\left(1 + \frac{s}{k}\right) \quad (39), \end{aligned}$$

т.е. распределение (36) отличается от распределения (18) только масштаба по оси скоростей.

Распределение типа (36) можно строить для значений скорости, усредненных по любому интервалу времени, например, для скорости ветра  $\langle v \rangle_{ij}$ , измеряемой каждый  $i$ -й год в  $l$ -й момент (час) суток  $j$ -го месяца и усредненной по всем суткам в месяце, или среднемесячной скорости  $j$ -го месяца  $\langle v \rangle_{ij}$ , измеряемой каждый  $i$ -й год. Следует отметить, что при этом от распределения к распределению будут изменяться не только средние, или ожидаемые, значения скорости (параметра  $c$ ), что в первую очередь определяется их временной зависимостью, но и параметры крутизны  $k$ , характеризующие статистический разброс соответствующих характеристик скорости [5,6,18,21-22,29].

#### Удельная мощность и удельная энергия ветрового потока

Удельная мощность потока ветровой энергии равна энергии, переносимой ветром в единицу времени через единицу площади, перпендикулярной скорости ветра. Для стационарного потока воздуха со скоростью  $v$ , м/с, удельная мощность  $P(v)$ , Вт/м<sup>2</sup>, равна:

$$P(v) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^3 \quad (40),$$

где  $\rho$ , кг/м<sup>3</sup>, – плотность воздуха.

Средняя удельная мощность потока ветровой энергии может быть выражена двояким образом в соответствии с приведенными представлениями распределения скоростей ветра в потоке.

При использовании экспериментальных повторяемостей скоростей  $t_i$  средняя удельная мощность  $\langle P \rangle$  выражается как

$$\langle P \rangle = \sum_{i=1}^n P(v_i) \cdot t_i = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n v_i^3 \cdot t_i \quad (41),$$

т.е. через оценку третьего начального момента скорости.

При использовании аналитической функции распределения скоростей получа-

ем следующее математическое ожидание мощности:

$$M[P] = \int_0^{\infty} P(v) \cdot f(v) dv = \frac{1}{2} \cdot \rho \int_0^{\infty} v^3 \cdot f(v) dv \quad (42),$$

что для распределения Вейбулла дает

$$M[P] = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c^3 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (43).$$

Различие между результатами расчета мощности по формулам (41) и (43) служит косвенной проверкой адекватности использования аналитической функции распределения скоростей и репрезентативности выработки  $n$  измерений скорости [5,6,18,21-22,29].

Формулы (41-43) могут быть применены для любого момента или интервала времени, такого, как месяц, сезон или год. Например, для интервала времени  $T_j$ , с,  $j$ -го месяца со средней удельной мощностью ветра  $\langle P \rangle_j$ , среднемесячная удельная энергия ветра  $E_{Bj}$ , Дж/(м<sup>2</sup> \* мес.), представляется выражением:

$$E_{Bj} = \langle P \rangle_j \cdot T_j \quad (44),$$

а для периода  $T$ , с, всего года со средней мощностью  $\langle P \rangle$  среднегодовая удельная энергия ветра  $E_B$ , Дж/(м<sup>2</sup> × год), связана с  $E_{Bj}$  ( $j = 1, 2, \dots, 12$ ) соотношением:

$$\begin{aligned} E_B &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot T \cdot \sum_{i=1}^n v_i^3 \cdot t_i = \sum_{j=1}^{12} E_{Bj} = \\ &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \sum_{j=1}^{12} T_j \cdot \sum_{i=1}^n v_i^3 \cdot t_{ij} \quad (45), \end{aligned}$$

где  $t_{ij}$  – повторяемость скорости  $v_i$  в  $j$ -м месяце.

Аналогичное соотношение существует для оценки среднегодовой удельной энергии ветра как математического ожидания:

$$\begin{aligned} E_B &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot T \cdot \int_0^{\infty} v^3 \cdot f(v) dv = \\ &= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \sum_{j=1}^{12} T_j \cdot \int_0^{\infty} v^3 \cdot f_j(v) dv \quad (46), \end{aligned}$$

где  $f_j(v)$  – дифференциальная функция распределения скорости ветра в  $j$ -й месяц.

**Распределение удельной мощности ветрового потока на территории Туркменистана.** Для фонового районирования равнинных территорий по удельной мощности ветрового потока ( $P$ ) используются

данные метеостанций, расположенных в открытой местности на плоских или выпуклых формах рельефа (классы открытости по Милевскому – 6б и выше, таблице 3). В соответствии с этим принципом для районирования для Туркменистана было отобрано около 72 метеостанций и выведены районы, соответствующие следующим шести диапазонам удельной мощности ветра, Вт/м<sup>2</sup>, на высоте 10 м: 1) <75, 2) 75-125, 3) 125-250, 4) 250-500, 5) 500-1000, 6) 1000-1500. Составления карту ветроэнергетического потенциала позволяет определить удельную ветровую энергию на ровной открытой местности. Если же ставить целью размещение ветроэлектрических установок в энергетически более благоприятных условиях, например, на верхних частях склона, то следует ввести поправки, учитывающие форму рельефа местности [5,6,18,21-22, 29,32-34].

**Валовый потенциал ветровой энергии региона.** Исходя из общего определения валового потенциала возобновляемых источников энергии, можно сформулировать следующее определение для ветровой энергии.

В отличие от других возобновляемых источников энергии, например, солнечной, в определение валового потенциала ветровой энергии входит условие возможности ее использования, поскольку ветер хотя и занимает огромные объемы в атмосфере Земли над регионом, но практически возможно использовать только малую часть общего ресурса ветровой энергии. При этом требуется выработать согласованные принципы возможно использования энергии ветра и оценки соответствующих потенциальных возможностей региона. В современных научных разработках общепринятым принципом является использование энергии ветра на определенной высоте  $h$  над поверхностью Земли. В данной работе принимается значение  $h = 50$  м.

Регион представляется как совокупность участков, или зон, в каждой из которых удельная мощность ветровой энергии, а также географические, климатические и погодные условия являются однородными по всей площади зоны. Как правило, зоны должны соответствовать расположению метеорологических станций. Валовый потенциал региона представляет сумму валовых потенциалов составляющих его зон [5,6,18, 21-22,29].

**Методика определения валового потенциала.** В соответствии с определениями, валовый потенциал рассчитывается как суммарная энергия ветра, которая может быть использована системой ветроэлектрических установок высотой  $h$ . На основании имеющихся исследований обтекания препятствий воздушными потоками принимается условие, что возмущенный поток полностью восстанавливается расстоянии, равном  $20h$  от каждой установки. Таким образом, полное использование энергии ветра высоте  $h$  осуществляется ветроэнергетической системой, в которой ряды ветроэнергетических установок, ориентированных перпендикулярно направлению ветра, отстоят друг от друга на расстоянии  $20h$ , так что полная ветровая энергия, захватываемая установками на площади территории  $S$ ,  $m^2$ , в год, представляет валовый потенциал территории  $W_B$ , кВт\*ч/год, который при удельной энергии ветра  $E_B$ , кВт\*ч/( $m^2$  \* год), равен

$$W_B = E_B \cdot \frac{S}{20} = \frac{1}{40} \cdot \rho \cdot T \cdot S \cdot \sum_{i=1}^n v_i^3 \cdot t_i \quad (47)$$

или

$$W_B = \frac{1}{40} \cdot \rho \cdot T \cdot S \cdot \int_0^{\infty} v^3 \cdot f(v) dv \quad (48)$$

Для распределения Вейбулла это дает выражение:

$$W_B = \frac{1}{40} \cdot \rho \cdot T \cdot S \cdot c^3 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (49).$$

Валовый потенциал можно представить как сумму потенциалов  $j$ -х месяцев  $W_{Bj}$

$$W_B = \sum_{j=1}^{12} W_{Bj} = \sum_{j=1}^{12} E_{Bj} \cdot \frac{S}{20} \quad (50).$$

Значение валового потенциала, соответствующее высоте  $h = 50$  м, может быть получено путем использования восстановления дифференциальной повторяемости скорости ветра на этой высоте  $t_1$  по данным скоростей на высоте флюгера, полученным на ближайшей метеостанции или специальными измерениями, а также путем использования восстановления дифференциальной функции распределения скоростей  $f(v)$ , как это описано в выше и приведены на рисунке 4,5 [5,6,18,21-22,29].

Различие между численными значениями по формулам (47) и (48) служит оценкой погрешностей измерений и методики расчета валового потенциала ветровой энергии.

**Технический потенциал ветровой энергии региона.** Исходя из общего определения технического потенциала возобновляемых источников энергии, а также отмеченной выше специфики использования ветровой энергии, можно сформулировать следующее определение.

Технический потенциал региона представляет сумму технических потенциалов составляющих его зон [5,6,18-22,29].

**Методика определения технического потенциала.** Один из основных параметров технического потенциала зона представляет площадь территории  $S_T$ ,  $m^2$ , которая по хозяйственным и экологическим соображениям представляется целесообразной для использования ветровой энергии; она равна части  $q$  общей площади  $S$ , остающейся после вычитания площадей сельскохозяйственных угодий, промышленных и водохозяйственных территорий, парков, жилых, медицинских и культурных строений и др.,

$$S_T = q \cdot S \quad (51).$$

Значение  $q$  являются специфическими для каждой зоны, причем в настоящее время приняты следующие правила [29,30]:

- утилизация ветровой энергии целесообразна в районах, где среднегодовая скорость ветра не ниже 5 м/с, или, в соответствии с более точным подходом, коэффициент использования установленной мощности ветроэлектрической установки большого класса мощности (более 100 кВт) оказывается не ниже 20%;

- в указанных районах для развития ветроэнергетики может быть использовано, не более 30% территории;

- наиболее эффективным является утилизация ветровой энергии с помощью ветроэлектрических установок большой мощности (от 100 до 500 кВт).

В Туркменистане общая площадь регионов со среднегодовой скоростью ветра выше 5 м/с составляет около 15% ее территории, а площадь регионов с коэффициентом использования мощности более 20% (для современных установок мощностью 250 кВт) превышает 20% территории. Таким образом, для Туркменистана получаем среднюю оценку  $q \approx 0.06$ . Распределение ветроэнергетических ресурсов Туркменистана установленной мощности по территории представлено на рисунке 6 [5,6,18,21-22,29].

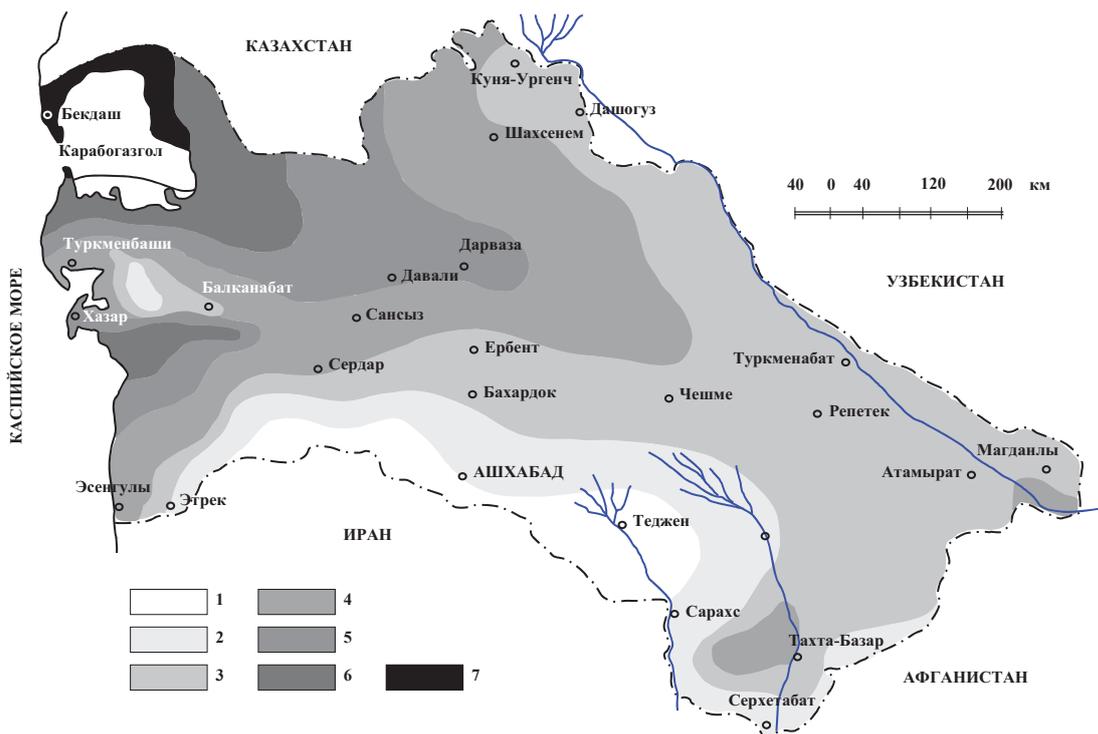


Рис. 6. Ветроэнергетические ресурсы Туркменистана  
 1 – районы, где энергия воздушного потока с 90%-ной обеспеченностью составит менее 100 кВтч/м<sup>2</sup> в год; 2 – от 100 до 200; 3 – от 200 до 400; 4 – от 400 до 600; 5 – от 600 до 800; 6 – от 800 до 1000; 7 – более 1000

**Мощностная зависимость.** Зависимость мощности ветроэлектрической установки  $N(v)$ , Вт, с диаметром ветротурбины  $D$ , м, от скорости ветра определяется выражением:

$$N(v) = \frac{\pi}{4} \cdot D^2 \cdot P(v) \cdot \eta(v) = \frac{\pi}{8} \cdot D^2 \cdot \rho \cdot v^3 \cdot \eta(v) \quad (52).$$

где  $\eta(v)$  – КПД установки при данной скорости ветра.

Средняя мощность ветроэлектрической установки  $\langle N \rangle$ , Вт, приобретает выражение

$$\langle N \rangle = \frac{\pi}{8} \cdot D^2 \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n v_i^3 \cdot \eta(v_i) \cdot t_i \quad (53),$$

ее математическое ожидание имеет вид

$$M[N] = \int_0^{\infty} N(v) f(v) dv = \frac{\pi}{8} \cdot D^2 \cdot \rho \cdot \int_0^{\infty} v^3 \cdot \eta(v) \cdot f(v) dv \quad (54).$$

Порядок размещения ветроэлектрических установок для максимального исполь-

зования ветрового потока в общем случае зависит от розы ветров на местности.

Модель обладает серьезными недостатками. Во-первых, в точке  $v = v_p$  происходит скачкообразное изменение мощности  $N(v)$ , что физически не реально и не подтверждается экспериментально. Во-вторых, в расчетной точке  $v = v_p$  КПД современных ветроэлектрических установок намного меньше максимального КПД (59). Поэтому данная модель дает завышенные значения мощности [5,6,18,21-22,29].

Если ветры имеют одно преимущественное направление, например, на побережье морей, то, как и при расчете валового потенциала, оптимальная структура ветроэнергетической системы соответствует расположению ветроэлектрических установок в виде рядов, ориентированных перпендикулярно ветру и отстоящих друг от друга на расстоянии  $20 D$ . При этом на площади  $S_T$  можно разместить  $S_T / (20 \times D^2)$  установок, так что энергия, вырабатываемая в течение года ( $T = 8760$  ч/год) всеми установками на площади  $S_T$ , т.е. технический потенциал ветровой энергии  $W_T$  кВт\*ч/год, оказывается равной

$$W_T = \frac{\langle N \rangle}{1000} \cdot T \cdot \frac{S_T}{20 \cdot D^2} \quad (55),$$

что при учете выражения (53) дает:

$$W_T = \frac{T \cdot S_T}{100000} \cdot \frac{\pi}{1.6} \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n v_i^3 \cdot \eta(v_i) \cdot t_i \quad (56).$$

Если ветры могут менять свои направления примерно равномерно по румбам, то ветроэлектрические установки целесообразно размещать в шахматном порядке с расстоянием между ближайшими  $20D$ . При этом на площади  $S_T$  можно разместить  $S_T/(100D)$  установок, так что технический потенциал ветровой энергии  $D$ , кВт\*ч/год, оказывается равным

$$W_T = \frac{\langle N \rangle}{1000} \cdot T \cdot \frac{S_T}{100 \cdot D^2} \quad (57),$$

что для (53) дает

$$W_T = \frac{T \cdot S_T}{100000} \cdot \frac{\pi}{8} \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n v_i^3 \cdot \eta(v_i) \cdot t_i \quad (58)$$

т.е. в 5 раз меньше потенциала (56).

В более общем случае, когда существует преимущественный сектор направлений ветра, целесообразно обеспечить специальное размещение ветроэлектрических установок на территории и, в таком случае, технический потенциал будет представляться значением промежуточным между (55) и (57) [5,6,18,21-22,29].

Следует отметить, что технический потенциал ветровой энергии оказывается независимым от диаметра ветроколеса  $D$ , т.е. от абсолютной мощности используемых ветроэлектрических установок.

Зависимость мощности современных ветроэлектрических установок от скорости ветра  $N(v)$  включает три характеристические значения скорости: минимальное значение, или скорость включения  $v_B$  такая что при  $v \leq v_B$  мощности ветротурбины не хватает даже на преодоления момента сил трения на оси турбины, т.е.  $N(v) = 0$ ; расчетное значение  $v_p$ , такое что при  $v_B \leq v \leq v_p$  ветроэлектрическая установка развивает мощность и достигает номинального или установленного значения  $N_p$ ; максимальное значение, или скорость отключения,  $v_o$ , такая что в области  $v_p \leq v \leq v_o$  поддерживается постоянная мощность  $N_p$  за счет регулирующих устройств. При  $v \geq v_o$  энергия ветра не используется во избежание поломки установки. Поэтому зависимость

кпд от скорости  $\eta(v)$  является весьма сложной.

Зависимость  $N(v)$  является основной технической характеристикой, специфической для каждой ветроэлектрической установки и, строго говоря, должна входить в ее паспортные данные. Для оценки современного технического уровня разработок существуют две теоретические модели описания предельных характеристик мощности ветроэлектрической установки, представленные ниже [5,6,18,21-22,29].

**Модель постоянного коэффициента полезного действия в области выхода ветроэлектрической установки на расчетный режим.**

Первая модель [18] основана на использовании условия постоянства кпд установки  $\eta(v)$  в области скорости  $v_B \leq v \leq v_p$  и равенства его значению:

$$\eta_o = \xi \eta_p \eta_r \quad (59),$$

где  $\xi$  – реально достижимое значение коэффициента использования энергии ветра ветроколесом ( $\xi = 0.45 - 0.48$ );  $\eta_p = 0.9$  и  $\eta_r = 0.95$  – достижимые кпд редуктора и генератора, соответственно. При этом расчетное значение установленной мощности равно:

$$N_p = (\pi/8) D^2 \rho v_p^3 \eta_o \quad (60),$$

а кпд в области скоростей  $v_p \leq v \leq v_o$  ( $N = \text{const}$ ) падает обратно пропорционально кубу скорости

$$\eta(v) = \eta_o (v_p / v)^3 \quad (61).$$

Модель обладает серьезными недостатками. Во-первых, в точке  $v = v_p$  происходит скачкообразное изменение мощности  $N(v)$ , что физически не реально и не подтверждается экспериментально. Во-вторых, в расчетной точке  $v = v_p$  кпд современных установок на много меньше максимального кпд (59). Поэтому данная модель дает завышенные значения мощности [5,6,18,21-22,29].

**Модель линейного возрастания мощности в области выхода ветроэлектрической установки на расчетный режим**

Более адекватной является вторая теоретическая модель, в которой предполагается, что в области  $v_B \leq v \leq v_p$  мощность ветроэлектрической установки изменяется линейно от  $N(v_B) = 0$  до  $N(v_p) = N_p$  (например, [18,30]). Таким образом, данная модель включает следующую зависимость мощности ветроэлектрической установки от скорости ветра:

$$\begin{aligned}
 N(v) &= 0; v \leq v_B; v \geq v_O; \\
 N(v) &= N_P (v - v_B) / (v_P - v_B); v_B \leq v \leq v_P \\
 N(v) &= N_P; v_P \leq v \leq v_O
 \end{aligned}
 \tag{62-64}$$

При этом КПД установки имеет следующую зависимость:

$$\begin{aligned}
 \eta(v) &= 0; v \leq v_B; v \geq v_O; \\
 \eta(v) &= \eta(v_P) (v_P / v)^3 (v - v_B) / (v_P - v_B); v_B \leq v \leq v_P; \\
 \eta(v) &= \eta(v_P) (v_P / v)^3; v_P \leq v \leq v_O
 \end{aligned}
 \tag{65-67}$$

где значение КПД в расчетной точке равно:

$$\eta(v_P) = 8N_P / (\pi D^2 \rho v_P^3) \tag{68}.$$

КПД (2.70) имеет максимальное значение  $\eta_M$  (69):

$$\eta_M = (4/27)\eta(v_P)(v_P/v_B)^3 / (v_P/v_B - 1),$$

в точке  $v_M$ :

$$v_M = (3/2)v_B \tag{70}.$$

При условии  $v_M \leq v_P$ , что обычно выполняется, получаем:  $\eta_M \geq \eta_P$ . В частности, для ветроэлектрической установки фирмы MS-3 с установленной мощностью 300 кВт имеет:  $v_B = 5.0$  м/с,  $v_P = 11.4$  м/с, так что КПД в расчетной точке значительно меньше максимального КПД  $\eta_P = 0.73 \eta_M$ .

Данная модель довольно хорошо согласуется с экспериментом и в последние годы обычно используется в исследованиях и практических расчетах. Фактически представленная зависимость характеризует технический уровень современных разработок ветроэлектрических установок. Соответственно этому средняя мощность ветроэлектрической установки  $\langle N \rangle$ , Вт, приобретает выражение (71):

$$\langle N \rangle = N_P \cdot \left( \sum_{v_j \geq v_B}^{<v_P} \frac{(v_i - v_B) \cdot t_i}{v_P - v_B} + \sum_{v_i \geq v_P}^{<v_O} t_i \right),$$

где  $v$  обозначает значение  $v_i$ , ближайшее снизу к значению  $v$ .

Поскольку установленная мощность  $N_P$  пропорциональна  $D^2$ , то технический потенциал  $W_T$  (55) или (57) по-прежнему не зависит от  $D$ .

Полученные выражения для технического потенциала (56), (58), как и (71), мож-

но также представить в виде интегралов с функцией распределения по скоростям  $f(v)$ .

Отношение средней мощности ветроэлектрической установки  $\langle N \rangle$  (или ее математического ожидания) к установленной мощности  $N_P$ , называемое коэффициентом использования установленной мощности  $K$ ,

$$K = \frac{\langle N \rangle}{N_P} \tag{72}$$

является важной характеристикой одновременно самой установки и ветровой энергии [5,6,18,21-22,29].

**Экономические характеристики ветроэлектрических установок.** Ветровая энергия представляет один из наиболее дешевых возобновляемых источников энергии. Однако проблема широко использования ветроэлектрических установок в энергетике связана с их экономической эффективностью и конкурентоспособностью по сравнению с традиционными системами.

**Удельная стоимость производимой электроэнергии и установленной мощности ветроэлектрических установок.** В начале 80-х гг., когда в мире началось промышленное использование ветроэлектрических установок, средняя стоимость производимой ими электроэнергии составляла примерно 30 цент./(кВт\*ч), что было значительно выше стоимости энергии от традиционных органических источников – нефти, угля и газа. За последние 15 лет стоимость электроэнергии от установок, подключенных к энергосистемам, снизилась более чем в 6 раз. На рис.7 [30] представлены графики изменения стоимости вырабатываемой электроэнергии и установленной мощности зарубежных сетевых ветроэлектрических станций по годам. В 1996 г. сто-

имость электроэнергии составляла менее 5 цент./кВт\*ч) и была сравнима со стоимостью энергии, получаемой при использовании традиционных топлив. Более того, в настоящее время, например, в Дании стоимость электроэнергии от ветроэлектрических станций меньше, чем от электростанций на угле.

За тот же 15-летний период удельная стоимость установленной мощности ветроэлектрических станций, подключенных к энергосистемам, уменьшилась в 4 раза с 4000 долл./кВт до 1000 долл./кВт [5,6,18,21-22,29].

Стоимость установленной мощности возобновляемых источников энергии для конкретного региона, в том числе ветроэлектрических установок, включает в стоимость производства соответствующего оборудования, расходы по его транспортировке на место установки и стоимость строительства. Определение стоимости установки, а также ресурса ее работы в натуральных условиях, позволяет установить стоимость вырабатываемой полезной энергии и привести сравнение с другими источниками энергии, в первую очередь с традиционными. Тем самым может быть определена экономическая целесообразность и эффективность использования того или иного вида возобновляемых источников энергии в данном регионе.

Основной подход к расчету экономических параметров установок возобновляемых источников энергии был предложен и представлен в работе [18]. Он включает определение эффективности установок в конкуренции с использованием традиционных видов топлив для трех характерных зон страны: зоны централизованного гарантированного энергоснабжения, зоны централизованного энергообеспечения с дефицитом электроэнергии и зоны с автономным энергообеспечением.

Пустыня Каракумы в Туркменистане занимает 80% территории и около 40 млн. га отведены под пастбищные угодья, где имеются малые населенные пункты, в которых проживают животноводы. ЛЭП невыгодно тянуть, для таких категории земель важную роль может сыграть использование возобновляемых источников энергии [5,6,18,21-22,29].

Удорожание энергоносителей во всем мире в последние десятилетия, повышающиеся требования к чистоте окружающей среды, а также рост потребления энергии-

приводят к увеличению затрат для получения тепловой и электрической энергии, вырабатываемой с использованием органического топлива.

Вследствие же совершенствования технологий преобразования энергии возобновляемых источников, заметно снижение стоимости электроэнергии, вырабатываемой при их использовании [5,6,18,21-22,29].

Составленная карта на рис. 6, дает количественную оценку ветроэнергораспределения ресурсов на территории Туркменистана. Используя ее, можно подсчитать энергетические ресурсы пастбищных районов. Годовой экономический эффект от комбинированного использования гелиоветроэнергетических систем теплоснабжения дома в сельской местности площадью 150 м<sup>2</sup> составит 0.4 тыс. долларов в год и сэкономит на душу внесения 180-200 кг. у.т. в год. За счет ветроагрегата можно удовлетворить от 40-85% энергопотребления. Во многих странах мира ветроагрегаты в первую очередь широко используются в малых населенных пунктах, сельской местности, в приморских районах, следовательно, в Туркменистане есть все возможности для активного применения гелиоветроэнергоустановок для улучшения бытовых условий человека.

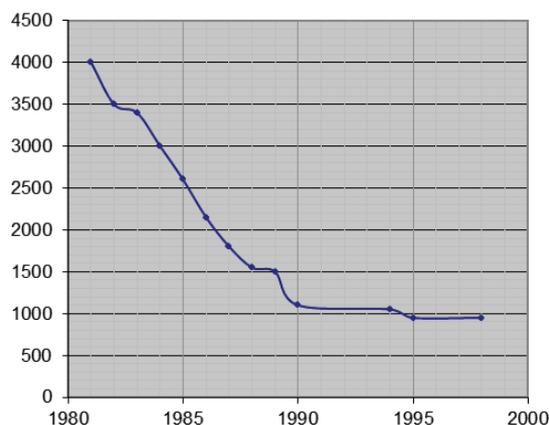


Рис. 7. Изменение стоимости электроэнергии и удельная стоимость установленной мощности сетевых ВЭС за рубежом

На основе данных зарубежного источника приведены [3,4,9-11] стоимость электроэнергии, вырабатываемой электростанциями (ЭС), использующими традиционные энергоресурсы и необходимые удельные капитальные вложения.

По данным [5,6,18,21-22,29] в Дании и Англии уже достигнута стоимость электро-

энергии (4,0-4,7 цент /кВтч.) вырабатываемой ветроэлектроустановками (ВЭУ), хотя удельные капитальные вложения там несколько выше (1200-1600 долл. США/кВт).

Стоимость электроэнергии, вырабатываемой, на основе возобновляемых источников энергии сравнивалась, а в некоторых случаях стала ниже стоимости энергии, вырабатываемой ЭС на традиционном топливе. Кроме того, прослеживается тенденция удешевления электроэнергии, вырабатываемой ветро и солнечными ЭС и удорожания энергии, вырабатываемой традиционными ЭС с использованием органического топлива.

Несмотря на низкий коэффициент использования установочной мощности ( $\leq 0,5$ ) [18] и вероятностный характер выработки электроэнергии становятся конкурентно способными с ЭС на традиционном топливе.

**Экономическая эффективность ветроэлектрических установок в зонах централизованного энергообеспечения.** Стоимость вырабатываемой электроэнергии  $\Pi$ , долл./кВт\*ч или руб./кВт\*ч, и стоимость установленной мощности  $C$ , долл./кВт или руб./кВт, связаны с такими экономическими параметрами, как срок окупаемости и срок службы установки.

Срок окупаемости ветроэлектрической установки  $T_{ок}$ , год, определяется по формуле

$$T_{ок} = \frac{N_p \cdot C}{E \cdot \Pi_T - I_{эк}} \quad (73),$$

где  $N_p \times C$  – общая стоимость установки (капитальные затраты), долл. или манат;  $E = \langle N \rangle T$  – электроэнергия, вырабатываемая установкой в год, кВт\*ч/год,  $T = 8760$  ч/год;  $\Pi_T$  – стоимость энергии традиционного источника, долл./год или ман./кВт\*ч;  $I_{эк}$  – издержки эксплуатации, долл./год или ман./год.

Стоимость энергии, выработанной установкой,  $\Pi$ , долл./кВт\*ч или ман./кВт\*ч, связана со сроком службы установки  $T_{сл}$  год, соотношением

$$\Pi = \frac{N_p \cdot C + I_{эк} \cdot T_{сл}}{E \cdot T_{сл}} \quad (74).$$

Если ввести коэффициент использования установленной мощности  $K$  (71) и норму издержек эксплуатации  $\gamma$ , 1/год, в соответствии с условием

$$I_{эк} = \gamma N_p C \quad (75),$$

то срок окупаемости (73) представится в виде:

$$T_{ок} = \frac{C}{T \cdot K \cdot \Pi_T - \gamma \cdot C} \quad (76),$$

а стоимость энергии (74) выразится как

$$\Pi = \frac{C \cdot (1 + \gamma \cdot T_{сл})}{K \cdot T \cdot T_{сл}} \quad (77).$$

Экономический эффект использования ветроэлектрической установки  $\mathcal{E}$ , выраженный в долл., или ман., может определен как цена энергии, произведенной установки за период работы после срока окупаемости установки:

$$\mathcal{E} = (T_{сл} - T_{ок}) \cdot (E \cdot \Pi_T - I_{ЭТ}) \quad (78).$$

Как видно, экономические показатели, определяющие целесообразность и эффективность использования ветроэлектрических установок, сильно зависят от стоимости  $\Pi_T$  электроэнергии, получаемой от традиционных видов топлива. В зонах централизованного энергоснабжения стоимость довольно низка, что снижает экономический эффект использования энергии ветра. По тарифу 1999 г.  $\Pi_T = 48$  ман./кВтч, или примерно 0.009 долл. США/кВт\*ч, т.е. в несколько раз меньше стоимости электроэнергии, вырабатываемой ветроустановками. В тоже время наличие электрических сетей является благоприятным условием для подключения к ним ветроэлектрических установок и обеспечивая их устойчивой работы [5,6,18,21-22,29].

Практически важный случай представляют районы, формально находящиеся в зонах централизованных энергосетей, но остродефицитные по энергии. Наличие дефицита энергии, как правило, приводит к значительным потерям, с том числе материальным и финансовым. Это означает, что в энергодефицитных районах проблема использования возобновляемых источников энергии становится более насущной и острой, а определение экономического эффекта ввода энергоустановки приводит к замене формулы (78) на следующую:

$$\mathcal{E} = (T_{сл} - T_{ок}) \cdot (E \cdot \Pi_T - I_{ЭК}) + T_{сл} Q (\Pi_{пр} - \Pi_T) \quad (79),$$

где  $Q$ , кВт\*ч/год, – годовой дефицит энергии, покрываемой энергоустановкой;  $\Pi_{пр}$ , ман./кВт\*ч, удельная цена потерь от дефицита энергии.

Величины  $Q$  и  $C_{II}$  могут иметь другую интерпретацию, пригодную для любого региона, на только остродефицитного.

Именно:

$Q$ , кВт\*ч/год, – годовая потребность промышленного производства региона в электроэнергии, покрываемая энергоустановкой;

$C_{II}$ , ман./(кВт\*ч), – цена товаров промышленного производства региона, приходящаяся на единицу потребляемой электроэнергии [5,6,18,21-22,29].

**Экономический эффект использования автономных энергоустановок и региональные факторы стоимости.** Гораздо больший экономический эффект имеет создание автономных ветроэлектрических установок в регионах, удаленных от централизованных энергосетей, хотя при этом возникают определенные трудности обеспечения их устойчивой работы в условиях быстрого изменения скорости ветра, а также возможных длительных периодов затишья. Потребности населения и хозяйства указанных регионов в электроэнергии весьма велики, а стоимость традиционных видов топлива намного выше их стоимости в зонах централизованного получения и распределения энергии из-за транспортных расходов и потерь топлива при транспортировке. Исходя из этого, в стоимость топлива в регионе  $C_{TP}$  включается региональный фактор  $r_p$ :

$$C_{TP} = r_p \cdot C_T \quad (80),$$

где  $r_p > 1$  и для различных регионов может изменять свою величину. В то же время удельная стоимость установленной мощности  $C$  почти не изменяется в сравнении с  $C_{TP}$ . Поэтому при замене  $C_T$  на  $C_{TP}$  в формулах (73), (79) рассчитываемый срок окупаемости атомных установок в зонах, удаленных от централизованных сетей, уменьшается, а экономический эффект возрастает пропорционально  $r_p$ .

Необходимо также учитывать, что сегодня в Туркменистане цены на энергоносители имеют нерегулярный характер, подвержены постоянному росту и неравномерности по регионам Туркменистана, прежде всего из-за условий транспортировки. Поэтому решение вопроса об экономической целесообразности и эффективности использования ветроэлектрических установок, как и установок других нетрадиционных видов

энергии, сильно зависит от местных климатических, географических и социально-экономических условий [3-9,13-22,26-29].

В представленных выражениях, определяющих экономическую эффективность, не учитывается влияние вводимых установок на окружающую природу, на социальные условия жизни и деятельности человека, что в целом определяется как экологические условия. Возобновляемые источники энергии по сравнению с традиционными обладают важными преимуществами, заключенным в возможности обеспечения экологической чистоты вводимых установок, а в некоторых случаях – возможности улучшения экологической обстановки.

Одной из форм учета влияния вводимых источников энергии на экологию региона может быть введение в удельную стоимость получаемой энергии регионального экологического фактора источника  $r_3$ , учитывающего относительные расходы на компенсацию вредных последствий ввода единицы энергии того или иного источника в регионе. Если  $C$  – удельная стоимость источника энергии в производстве, то удельная стоимость с учетом регионального экологического фактора  $C_3$  выражается как

$$C_3 = r_3 C \quad (81),$$

причем  $r_3 > 1$  для источника, приводящего к ухудшению экологической обстановки в регионе, и  $r_3 < 1$  – для источника, улучшающего экологическую обстановку в регионе; для одного и того же источника  $r_3$  в различных регионах может изменять величину, становиться больше или меньше единицы. Аналогичное выражение существует и для стоимости традиционных видов топлива:

$$C_{TP3} = r_{T3} \cdot C_{TP} = r_{T3} \cdot r_p \cdot C_T \quad (82).$$

Таким образом, с учетом регионального фактора стоимости топлива и регионального экологического фактора срок окупаемости и экономический эффект использования ветроэлектрической установки в общем случае определяются выражениями:

$$T_{OK} = \frac{N_p \cdot r_3 \cdot C}{E \cdot C_{TP3} - I_{ЭК}} \quad (83),$$

$$\begin{aligned} \mathcal{E} = & (T_{СЛ} - T_{OK})(E C_{TP3} - I_{ЭК}) + \\ & + T_{СЛ} Q(C_{II} - C_{TP3}) \end{aligned} \quad (84).$$

Таблица 7

Срок окупаемости ветроэлектрических установок  $T_{OK}$ , год

Стоимость электроэнергии, $C_{TPЭ}$ , долл./кВт*ч	Коэффициент использования установленной мощности $K$ , %					
0.01	26.6					
0.02	7.98	13.0	26.6			
0.05	2.58	3.75	5.92	7.98	12.3	26.6
0.10	1.21	1.78	2.58	3.33	4.70	7.98

Зависимость срока окупаемости ветроэлектрической установки  $T_{OK}$  от коэффициента использования установленной  $K$  (72) при современной стоимости установленной мощности  $C_{Э} = 1000$  долл./кВт и типичном значении нормы эксплуатационных издержек  $\gamma = 0.05$  представлена в таблице 7 для ряда значений стоимости электроэнергии из традиционных видов топлива  $C_{TPЭ}$  [3-9,13-22,26-29].

Следует отметить, что экономический эффект (84) можно представить как сумму экономических эффектов  $j$  – месяцев каждого года с длительность  $T_j$ , ч/мес., средней мощностью  $\langle N \rangle$ , кВт, и потребностью производства  $Q_j$ , кВт\*ч/мес., посредством представления (85):

$$E = \langle N \rangle \cdot T = \sum_{j=1}^{12} E_j = \sum_{j=1}^{12} \langle N \rangle_j \cdot T_j;$$

$$Q = \sum_{j=1}^{12} Q_j \quad (85).$$

Эти выражения позволяют учесть относительный вклад месяцев в году получение экономического эффекта и в покрытие соответствующих потребностей в энергии за счет ветроэлектрической установки.

Если в регионе функционируют  $M$  ветроэлектрических установок, то суммарный экономический эффект их использования  $\mathcal{E}_B$ , долл. или руб., при общей потребности производства региона в электроэнергии  $Q_{TP}$ , кВт/год, равен:

$$\mathcal{E}_B = \mathcal{E}M = (T_{TC} - T_{OK})M(E C_{TPЭ} - C_{ЭК}) + T_{CL} Q_{II} (C_{II} - C_{TPЭ}) \quad (86).$$

Поскольку обычно удельная цена производимых промышленностью ценностей (или материальных и финансовых потерь из-за дефицита энергии) больше соответствует стоимости топлива (а часто – много больше),

$$C_{II} > C_{TPЭ} \quad (87),$$

то экономический эффект использования энергии нетрадиционных источников может оказаться очень значительным.

Экономический эффект расчет с увеличением срока службы установки  $T_{CL}$ , а при  $T_{CL} < T_{OK}$  может оказаться отрицательным, что соответствует невыгодности применения установки [3-9,13-22,26-29].

#### 4. Экономический потенциал ветровой энергии региона

Экономический потенциал ветровой энергии региона – это величина годового поступления электрической энергии в регионе от использования ветроэлектрических установок, получение которой экономически оправдано при существующем уровне цен на производство, транспортировку и потребление энергии и топлива и соблюдении экологических норм.

Экономический потенциал региона представляет сумму экономических потенциалов составляющих его зон [18-22,30].

**Методика определения экономического потенциала.** В соответствии с определением экономический потенциал ветровой энергии региона  $W_{Э}$ , кВт\*ч/год, представляет энергию, которая может быть выработана в год ветроэлектрическими установками при условии, что их экономический эффект положителен

$$\mathcal{E}_B > 0 \quad (88).$$

При анализе выполнимости этого условия возможны два варианта.

**Вариант 1.** Если срок службы установки больше или равен сроку ее окупаемости,

$$T_{CL} \geq T_{OK} \quad (89)$$

то в силу обычно условия (87) экономический эффект использования установок (86) является положительным при любом их числе. Это означает, что в данном случае це-

лесообразно использовать максимально возможную мощность ветроэлектрических станций, так что экономический потенциал ветровой энергии оказывается совпадающим с техническим потенциалом, представленным выше в разделе:

$$W_{\text{э}} = W_T \quad (90).$$

*Вариант 2.* Если срок службы установок меньше срока ее окупаемости,

$$T_{\text{сл}} < T_{\text{ок}} \quad (91),$$

то выполнение условия эффективности (88) соответствует следующему ограничению на полную мощность ветроэнергетических систем:

$$\frac{E - I_{\text{эк}} \cdot M}{C_{\text{трэ}}} \cdot M \leq \frac{T_{\text{сл}} \cdot Q_{\text{п}} \cdot (C_{\text{п}} - C_{\text{трэ}})}{(T_{\text{ок}} - T_{\text{сл}}) \cdot C_{\text{трэ}}} \quad (92),$$

и одновременно, естественно,

$$E \times M \geq Q_{\text{п}} \quad (93).$$

Таким образом, в этом случае экономический потенциал соответствует наименьшей из двух представленных ниже величин.

Если срок службы близок к сроку окупаемости, точнее, если

$$T_{\text{ок}} - T_{\text{сл}} < T_{\text{сл}} \cdot Q_{\text{п}} / W_T \quad (94).$$

то экономический потенциал, как и в варианте 1, равен техническому потенциалу:

$$W_{\text{э}} = W_T \quad (95).$$

Если отличие срока службы от срока окупаемости значительно, то экономический потенциал определяется выражением:

$$W_{\text{э}} = T_{\text{сл}} Q_{\text{п}} (C_{\text{п}} - C_{\text{трэ}}) / [(T_{\text{ок}} - T_{\text{сл}}) C_{\text{трэ}}] + M I_{\text{эк}} / C_{\text{трэ}} \quad (96).$$

При условиях:

$$T_{\text{ок}} - T_{\text{сл}} \sim T_{\text{сл}}; C_{\text{п}} \gg C_{\text{трэ}} \quad (97),$$

и пренебрежении эксплуатационными издержками экономический потенциал дается оценкой

$$W_{\text{э}} \sim Q_{\text{п}} C_{\text{п}} / C_{\text{трэ}} \gg Q_{\text{п}} \quad (98).$$

В различных зонах региона для ветроэлектрических установок даже одного типа могут выполняться различные условия определения экономического потенциала (89), (94) или (97), что в значительной мере зависит от ветровой обстановки. Соответственно этому значения экономических потенциалов зон определяется формулами (90), (96) или (98). Экономический потенци-

ал региона будет равен их сумме [3-9,13-22,26-29].

Анализ данных по времени окупаемости ветроэлектрических установок, представленных в таблице 7, а также в существующей литературе, показывает, что условие (89) в реальных случаях может выполняться в зависимости от значений коэффициента использования установленной мощности установок  $K$  и региональной стоимости электроэнергии из традиционного топлива  $C_{\text{трэ}}$ . С использованием выражений (75), (81), (83) условие (89) может быть предоставлено в виде

$$K \geq K_{\text{э}} \quad (99),$$

где

$$K_{\text{э}} = (1 + \gamma T_{\text{сл}}) C_{\text{э}} / (C_{\text{трэ}} T \cdot T_{\text{сл}}) \quad (100)$$

- коэффициент, определяющий область экономической целесообразности использования установки;  $T = 8760$  ч/год. Регионы, в которых выполняется условие (99), имеют экономический потенциал ветровой энергии, равный их техническому потенциалу. При этом должно учитываться ограничение  $K < 1$ , так что при  $K_{\text{э}} > 1$  условие (99), естественно, не выполняется [3-9,13-22,26-29].

Для типичных величин  $C_{\text{э}} = 1000$  долл./кВт,  $\gamma = 0.05$  1/год,  $T_{\text{сл}} = 10$  лет,  $C_{\text{трэ}} = 0.04$  долл./кВт\*ч) получается значение  $K_{\text{э}} = 0.43$ .

Если условие (99) не выполняется, т. е.

$$K < K_{\text{э}} \quad (101),$$

то экономический потенциал ветровой энергии сохраняет значение (95) при достаточно больших  $K$ :

$$K \geq K_{\text{э}} / [1 + Q_{\text{п}} (C_{\text{п}} / C_{\text{трэ}} - 1) / W_T] \quad (102),$$

в промежуточной области значений  $K$

$$K_{\text{э}} C_{\text{трэ}} / C_{\text{п}} \leq K \leq K_{\text{э}} / [1 + Q_{\text{п}} (C_{\text{п}} / C_{\text{трэ}} - 1) / W_T] \quad (103),$$

экономический потенциал равен

$$W_{\text{э}} = K Q_{\text{п}} (C_{\text{п}} / C_{\text{трэ}} - 1) / (K_{\text{э}} - K) \quad (104),$$

а при малых  $K$

$$K \leq K_{\text{э}} C_{\text{трэ}} / C_{\text{п}} \quad (105),$$

экономический потенциал равен нулю:

$$W_{\text{э}} = 0 \quad (106).$$

Условие (105) означает, что стоимость энергии, производимый ветроэлектрической установкой, настолько большая, что создаваемые с ее помощью товары про-

мышленного производства по стоимости не покрывают расходов на электроэнергию, т.е. Использование установки нецелесообразно.

Таким образом, экономический потенциал ветровой энергии региона  $W_э$  имеет растущую зависимость от коэффициента использования установленной мощности  $K$ , определяемую тремя параметрами: коэффициентом экономической целесообразности установки  $K_э$ , экономическим параметрам потребности промышленности региона в энергии  $Q_п / W_т$  и ценовым параметром промышленного производства  $Ц_п / Ц_{трэ}$ . При этом, как показывает сравнение с результатами, зависимость  $W_э$  ветровой энергии от отношения  $K/K_э$  полностью совпадает с общей зависимостью экономического потенциала солнечной энергии от  $V / V_{ткр}$  приведенной на рис. 10.

Общая потребность региона в электроэнергии  $Q_о$  представляет сумму потребности производства  $Q_п$  и бытовой потребности населения  $Q_б$  введенной в [22-29]:

$$Q_о = Q_п + Q_б \quad (107),$$

$$Q_б = pN_ч \quad (108),$$

где  $p$ , Вт/чел., – средняя норма потребления электроэнергии одним человеком в быту (освещение, радио, телефон, телевизор, водоснабжение, бытовые электроинструменты);  $N_ч$  – число людей в регионе, нуждающихся в обеспечении быта электроэнергией.

В соответствии с этим можно использовать введенное ранее понятие избытка экономического потенциала ветровой энергии региона  $\Delta W_э$ , представляющего разницу между экономическим потенциалом и общей потребностью региона в электроэнергии:

$$\Delta W_э = W_э - Q_о \quad (109).$$

Если  $\Delta W_э > 0$ , то регион является экономически обоснованным потенциальным донором электроэнергии; если  $\Delta W_э < 0$ , то регион является потенциально дефицитным по энергии [18-23,29].

**Расчет основных параметров распределения Вейбулла для скорости ветра.**

Для построения аналитической функции распределения скорости ветра по фактическим данным повторяемости скоростей используется изложенный выше в разделе метод моментов, который основан на равенстве математических ожиданий первого и второго начальных моментов скорости (21) и (22), получаемых из распределения Вейбулла, экспериментальным оценкам соот-

ветственно среднего значения скорости и среднего квадрата скорости. Используя эти равенства, после вычислений по данным получаем следующие уравнения:

$$c \cdot \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) = \sum_{i=1}^n v_i \cdot t_i = 9.30 м/с \quad (111)$$

$$c^2 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right) = \sum_{i=1}^n v_i^2 \cdot t_i = 115.6(м/с)^2 \quad (112)$$

Отсюда находим значения параметров распределения Вейбулла для скоростей ветра на высоте  $h = 10$  м:

$$c = 10.46 м/с; k = 1.8 \quad (113)$$

Параметры распределения Вейбулла для скоростей ветра на высоте  $h_ф = 50$  м, в соответствии с результатами приведенные выше, включают масштабный параметр по оси скоростей  $\beta$ , т.е. коэффициент возрастания средней скорости с высотой [18-23, 29,30]:

$$\beta = \left(\frac{h_ф}{h}\right)^m = 5^m = 1.38 \quad (114).$$

Здесь использовано среднегодовое значение  $m = 0.2$ , однако с соответствии с таблицы 8, для прибрежных районов, к которым относится все Каспийское побережье, следует использовать скорректированное значение коэффициента возрастания скоростей ветра:

$$\beta = 1.25 \quad (115).$$

Таблица 8

Обобщенная расчетная характеристика ветра для Туркменистана. ( $v$  – скорость ветра М/с,  $Cv$  – результаты расчета параметров распределения Вейбулла)

Название города, поселка	v	s	Cv	g	b	M
Дашогуз	3,1	2,3	0,8	1,27	3,3	9,3
Карабогазгол	6,5	3,7	0,6	1,73	7,4	20,0
Хазар	4,9	2,8	0,6	1,73	5,6	8,5
Туркменабат	3,6	3,1	0,8	1,27	3,9	9,0
Бахардок	3,0	2,6	0,9	1,12	3,1	9,3
Бекибент	3,9	2,7	0,7	1,46	4,3	10,0
Ашхабад	2,0	2,0	1,0	1,0	2,0	5,0
Чаршанга	4,1	4,3	1,0	1,0	4,1	7,8
Илатань	2,4	2,2	0,9	1,12	2,5	9,3
Серхетабат	2,3	2,5	1,1	0,9	2,2	6,8

Таким образом, значения параметров  $c_\phi$  и  $k_\phi$  распределения Вейбулла для скоростей ветра на высоте  $h_\phi = 50$  м принимаются равными:

$$c_\phi = c \beta = 10.46 \cdot 1.25 \text{ м/с} = 13.08 \text{ м/с},$$

$$k_\phi = k = 1.8 \quad (116).$$

**Расчет удельной мощности и удельной энергии ветрового потока.** При использовании экспериментальных повторяемостей скоростей  $t_i$  на высоте 10 м средняя удельная мощность потока ветровой энергии  $\langle P \rangle$ , Вт/м<sup>2</sup>, на высоте 50 м оказывается равной:

$$\langle P \rangle = \sum_{i=1}^n P(v_i) \cdot t_i =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \sum_{i=1}^n (v_i \cdot \beta)^3 \cdot t_i = 2082.2 \text{ Вт/м}^2 \quad (117).$$

Здесь принято значение  $\rho = 1.226$  кг/м<sup>3</sup> для плотности воздуха в нормальных условиях при давлении 760 мм рт. ст. и температуре 15°C.

При использовании распределения Вейбулла для скоростей ветра на высоте 50 м математическое ожидание мощности определяется выражением:

$$M[P] = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \int_0^{\infty} (v \cdot \beta)^3 \cdot f(v) dv =$$

$$= \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot (c \cdot \beta)^3 \cdot \Gamma\left(1 + \frac{3}{k}\right) \quad (118),$$

что дает значение  $M[P] = 2067.0$  Вт/м<sup>2</sup>.

Отличие от значения (117) составляет всего 0.7%. Это подтверждает высокую адекватность аналитической функции распределения.

Средняя годовая удельная энергия ветра  $E_B$  равна

$$E_B = \langle P \rangle T = 18.240 \text{ кВт} \cdot \text{ч} / (\text{м}^2 \cdot \text{год}) \quad (119),$$

где  $T = 8760$  ч/год.

**Эмпирическая повторяемость скорости ветра.** В Туркменистане до настоящего времени оценка возможности использования энергии ветра основывалась на исследованиях крупно масштабного территориального распределения скорости и удельной мощности ветрового потока [4,5,6], по данным наблюдений за скоростью ветра на сети метеостанции (МС) [2]. На основе полученных данных были выделены районы

МС наиболее перспективные с точки зрения практического использования энергии ветра.

В результате математической обработки фактического материалов по 72 МС Туркменистана были вычислены статистические характеристики эмпирических распределений скорости ветра и по ним найдены уравнения 3-х типовых режимов повторяемости скорости ветра:

Режим повторяемости скорости ветра, характерный для побережья Каспийского моря (Хазар, Карабогазгол) может быть представлен зависимости в промилях (%):

$$t_i = 1571 \frac{\Delta g}{g} \cdot \frac{g_i}{g} e^{-0.75 \left(\frac{g_i}{g}\right)^{2.0}} \quad (120);$$

Режим повторяемости скорости ветра на равнинной территории пустыни Каракумы:

$$t_i = 1258 \frac{\Delta g}{g} \cdot \left(\frac{g_i}{g}\right)^{0.45} e^{-0.87 \left(\frac{g_i}{g}\right)^{1.45}} \quad (121);$$

Режим повторяемости скорости ветра в юго-восточной части Туркменистана (Бадхыза, верховьях Амударьи):

$$t_i = 1017 \frac{\Delta g}{g} \cdot \left(\frac{g_i}{g}\right)^{0.03} e^{-0.99 \left(\frac{g_i}{g}\right)^{1.03}} \quad (122);$$

Из уравнения (1-3) для всех трех типов вычислены повторяемости для  $g$  от 2,0 до 8,0 м/с через 0,2 м/с и получены значения в целых промилях для каждой скорости ветра  $g_i$  от 0 до 25 м/с.

## 5. Экологический потенциал Туркменистана

**Экологические выгоды от внедрения ветроэнергетической установки.** В представленных выражениях, определяющих экономическую эффективность, не учитывается влияние вводимых установок на окружающую природу, на социальные условия жизни и деятельности человека, что в целом определяется как экологические условия. Возобновляемые источники энергии по сравнению с традиционными обладают важными преимуществами, заключенным в возможности обеспечения экологической чистоты вводимых установок, а в некоторых случаях – возможности улучшения экологической обстановки.

Одной из форм учета влияния вводимых источников энергии на экологию региона может быть введение в удельную стоимость получаемой энергии регионального эколо-

гического фактора источника, учитывающего относительные расходы на компенсацию вредных последствий ввода единицы энергии того или иного источника в регионе. Если удельная стоимость источника энергии в производстве, то удельная стоимость с учетом коэффициент регионального экологического фактора, причем коэффициент регионального экологического фактора > 1 для источника, приводящего к ухудшению экологической обстановки в регионе, и коэффициент регионального экологического фактора < 1 – для источника, улучшающего экологическую обстановку в регионе; для одного и того же источника  $r_3$  в различных регионах может изменять величину, становится больше или меньше единицы [1,3-18].

Как видно из рис. 8. ожидаемые сокращения выбросов различных вредных веществ в окружающую среду в странах СНГ при средней годовой выработке ветровая

энергии 300 Вт/м<sup>2</sup> с удельной мощностью на 1 кв. м и при эквиваленте расхода топлива – 0,12 Кг/год, то сокращение загрязняющих веществ составит: SO<sub>2</sub> – 2,5 кг/год; NO<sub>x</sub> – 1,4 кг/год; CO – 0,2 кг/год; CH<sub>4</sub> – 0,4 кг/год; CO<sub>2</sub> – 191,8 кг/год; твердых веществ – 0,3 кг/год.

Таким образом, с учетом региональных факторов стоимости топлива и регионального экологического фактора срок окупаемости и экономический эффект использования ветроэлектрической установки в общем случае определяются включением коэффициент регионального экологического фактора. На рис. 8 представлены гистограмма, а на таблице 9 экологического потенциала ветроустановки вырабатываемой энергии 100 и более 1000 Вт/м<sup>2</sup> и возможности сокращения загрязняющих веществ от выработки с одного квадратного метра ветрового потока [21-26].

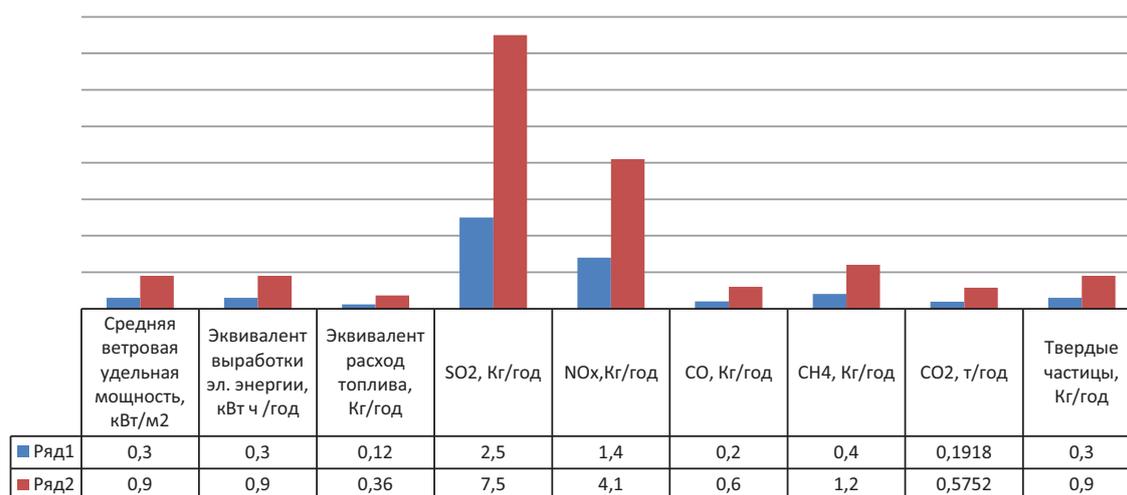


Рис. 8. Гистограмма экологического потенциала выработки ветроэнергии 300 Вт и 900 Вт с 1 м<sup>2</sup>

Таблица 9

Экологический потенциал от ветроэнергетических ресурсов с квадратного метра

кВт/кв.м	SO <sub>2</sub> т/год	NO <sub>x</sub> т/год	CO т/год	CH <sub>4</sub> т/год	CO <sub>2</sub> т/год	Твердые вещества т/год
100	0,000831	0,000448	5,81395E-05	0,000122	0,063953	8,72093E-05
200	0,001663	0,000895	0,000116279	0,000244	0,127907	0,000174419
300	0,002494	0,001343	0,000174419	0,000366	0,19186	0,000261628
400	0,003326	0,001791	0,000232558	0,000488	0,255814	0,000348837
500	0,004157	0,002238	0,000290698	0,00061	0,319767	0,000436047
600	0,004988	0,002686	0,000348837	0,000733	0,383721	0,000523256
700	0,00582	0,003134	0,000406977	0,000855	0,447674	0,000610465
800	0,006651	0,003581	0,000465116	0,000977	0,511628	0,000697674
900	0,007483	0,004029	0,000523256	0,001099	0,575581	0,000784884
1000	0,008314	0,004477	0,000581395	0,001221	0,639535	0,000872093

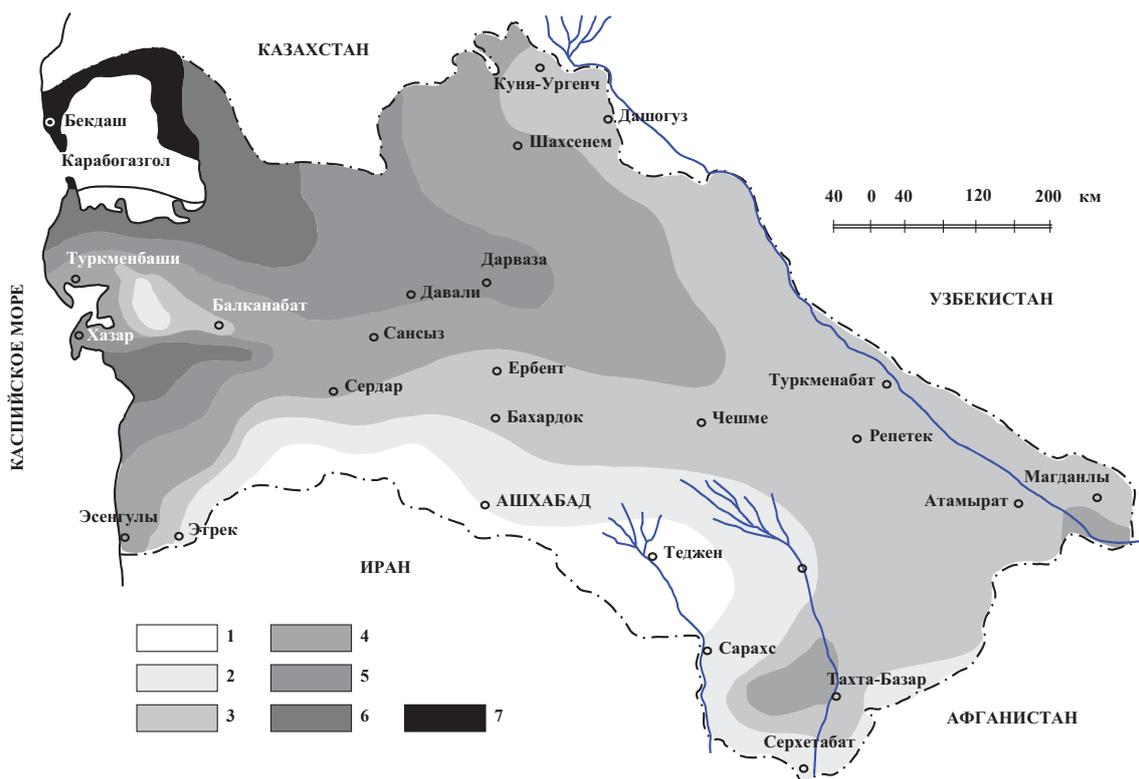


Рис. 9. ГИС экологическая карта сокращения  $CH_4$  и  $CO_2$  от ветроэнергетических ресурсов в Туркменистане с квадратного метра:

- 1 – районы, где энергия воздушного потока с 90%-ной обеспеченностью и сокращения  $CO_2$  составит менее 0,000122 и 0,063953 т / в год;  
 2 – от 0,000122 и 0,063953 до 0,000244 и 0,127907; 3 – от 0,000366 и 0,19186 до 0,000488 и 0,255814;  
 4 – от 0,000488 и 0,255814 до 0,000733 и 0,383721; 5 – от 0,000733 и 0,383721 до 0,001099 и 0,575581;  
 6 – от 0,001099 и 0,575581 до 0,001221 и 0,639535; 7 – более 0,001221 и 0,639535.

**ГИС экологическая карта для конечного пользователя.** Конечной задачей разработанной ГИС технологии является формирование доброжелательной информационной среды для пользователя наглядная карта.

Информационно-картографическая среда сформировалась в результате созданных баз данных и математических расчетах приведенных на рисунке 6 и модифицируя в процессе опытной эксплуатации в соответствии с уточняющимися требованиями разработана экологическая карта. Учитывая вышеназванное и созданные база данных построена однокомпонентная ГИС экологическая карта сокращения  $CH_4$  и  $CO_2$  от ветроэнергетических ресурсов в Туркменистане с квадратного метра смотрите рисунок 9.

**Шумовое воздействие.** Воздействие ветроэлектрических установок на окружающую среду и на человека, а также некоторые требования к их размещению и соответствующему отчуждению площади. Зави-

симость уровня шума от расстояния для ветротурбин по данным датской фирмы NQRDTANK и MICON. Для снижения шума в жилых домах ниже критического уровня ~ 40 – 45 дБ отдельная ветроэлектрическая установка должна располагаться от них далее 200м. Практически интересный случай представляет также шумовое воздействие крупных ветроэнергетических систем. Для ветроэлектрической станции мощностью 50 МВт, включающей 100 ветроустановок с единичной мощностью 500 кВт, максимально необходимая площадь размещения составляет около 13 км<sup>2</sup>, а удельная площадь размещения – 260 м<sup>2</sup>/кВт.

Следует, однако, отметить, что необходимая полоса отчуждения земли по периметру станции при сохранении на больших расстояниях характера зависимости уровня шума и должна иметь ширину более 1 км, т.е. общая отводимая площадь станции превысит 20 км<sup>2</sup>, а удельная площадь – 400 м<sup>2</sup>/кВт.

Другими важными параметрами технического потенциала являются достижимый технический уровень современных ветроэлектрических установок (по условию – с горизонтальной осью вращения ветротурбины на высоте  $h = 50$  м), выражающийся как максимально достижимая мощность в зависимости от скорости ветра, а также порядок размещения ветроэлектрических установок для максимального использования ветрового потока [3-18].

### 6. Заключение

Стремление человечества к улучшению условий жизни начинает приводить к изменению среды обитания. В то же самое время ответ на вызовы последних десятилетий лежит, что называется, на поверхности. Мы достигли того уровня знаний, когда энергию, столь необходимую для сбалансированного существования и движения вперед, можно добывать без нанесения вреда окружающему нас миру, и использовать с гораздо большей эффективностью, чем это делается сегодня. Говоря языком экономики, человечество может и должно честно и ответственно делить мировой экологический рынок со всеми видами и формами жизни на Земле. Вопросы развития возобновляемых источников энергии актуальны и для Туркменистана, вступившей в стадию модернизации и инновационного роста.

Из научно-аналитического обзора климатологических характеристик ветровой обстановки и теоретических расчетных формул потенциальные ресурсы энергии ветра характеризуется следующими показателями: скорость и сила ветра от  $16 \text{ Вт/м}^2$  (скорость –  $20 \text{ м/с}$ , сила –  $10$  баллов) до  $15\,000 \text{ Вт/м}^2$  (скорость –  $30 \text{ м/с}$ , сила –  $12$  баллов). Теоретический на  $1 \text{ м}^2$  территории в зависимости от скорости ветра может быть использовано около  $57\%$  ветровой энергии, практически не более  $33\%$ . Для фонового районирования равнинных территорий по удельной мощности ветрового потока используются данные метеостанций, расположенных в открытой местности на плоских или выпуклых формах рельефа (классы открытости по Милевскому –  $6 \text{ б}$  и выше, таблица 1. В Туркменистане было отобрано около  $72$  метеостанций и выведены районы, соответствующие следующим шести диапазонам удельной мощности ветра,  $\text{Вт/м}^2$ , на высоте  $10 \text{ м}$ : 1)  $<75$ , 2)  $75-125$ , 3)  $125-250$ , 4)  $250-500$ , 5)  $500-1000$ , 6) более  $1000$ .

Наиболее перспективными для размещения ветроэнергетических установок для страны является побережье морей и участки их шельфов. Так как на шельфах морей удельная мощность ветрового потока достигает более  $1000 \text{ Вт/м}^2$ , а на побережьях  $500-1000 \text{ Вт/м}^2$ , в то время как на удалений от побережий и в глубинных районах страны удельная мощность ветрового потока составляет  $100-500 \text{ Вт/м}^2$ .

### 7. Выводы

Из рассмотренных вышеизложенных позиции можно сделать следующие выводы:

1. Предложены методика расчетов ветроресурсов для прогнозирования выбросов парниковых газов в энергетике страны и регионов с использованием динамической территориально-производственной модели оптимизации ТЭК страны, позволяющая: выявить рациональные направления научно-технического прогресса в производстве, преобразовании и использовании энергии и оценить последствия для окружающей среды от их внедрения; определить состав и размеры возможных мероприятий по структурной перестройке энергетике с целью ослабления негативного влияния парниковых газов на окружающую среду; оценить динамику изменения выбросов парниковых газов в энергетике.

2. Составлена ветроэнергетическая карта ветроресурсов, дала предварительную оценку мероприятий по сокращению выбросов в энергетике от использования ветроустановок с одного метра квадратного площади.

3. В соответствии с разработанным ГИС технологий и составленной экологической ветропотенциала картой и методическим подходом получены оценки эколого-экономической эффективности внедрения “новых” проектов по сокращению выбросов  $\text{CO}_2$ . Это позволит оценить конкурентоспособность рассмотренных проектов относительно квот в регионе и проранжировать их по степени привлекательности для инвесторов, заинтересованных в получении квот по сокращенным выбросам для экобизнеса.

4. Представленные расчеты, составленная карта экоэнергетических ресурсов использование ветроэнергетических установок на территории Туркменистана будет эффективным, доступным средством энергосбережения и обеспечение экологической безопасности окружающей среды.

5. При средней годовой выработке ветровая энергии  $900 \text{ Вт/м}^2$  с удельной мощностью на  $1 \text{ кв. м}$  и при эквиваленте расхода топлива –  $0,36 \text{ Кг/год}$ , то сокращение вредных выбросов составит:  $\text{SO}_2$  –  $7,5 \text{ кг/год}$ ;  $\text{NO}_x$  –  $4,1 \text{ кг/год}$ ;  $\text{CO}$  –  $0,6 \text{ кг/год}$ ;  $\text{CH}_4$  –  $1,2 \text{ кг/год}$ ;  $\text{CO}_2$  –  $575,2 \text{ кг/год}$ ; твердых веществ –  $0,9 \text{ кг/год}$  [1,10,12].

#### Список литературы

- Бердымухамедов Г.М. Государственное регулирование социально-экономического развития Туркменистана. Том 1. – Ашхабад: Туркменская государственная издательская служба, 2010.
- Бабаев А.Г. и др. Физическая география Туркменистана: учебное пособие. – Ашхабад: Туркменская государственная издательская служба, 2014.
- Берштейн Л.С., Целых А.Н. Гибридная экспертная система с вычислительным модулем для прогноза экологических ситуаций. Труды международного симпозиума “Интеллектуальные системы – ИнСис – 96”, Москва, 1996.
- Дьяченко Н.В. Использование ГИС-технологий. – URL: <http://homepage.buryatia.ru/rmeic/gis.htm>
- Дурдыев А.М., Пенджиев А.М. Снижение энергетической антропогенной нагрузки на климатическую систему Туркменистана с помощью нетрадиционных источников энергии: материалы международного симпозиума по изменению климата. – М., 2003.
- Колодин М.В. Энергетические ресурсы Каракумов. В кн. Пустыня Каракумы и пустыня Тар. – Ашхабад: Ылым, 1992. – С. 157-171.
- Марчук Г.И. Математическое моделирование в проблемах окружающей среды. – М.: Наука, 1982. – 320 с.
- Козлов В.Б. Энергетика и природа. – М.: Мысль, 1982. – 92 с.
- Лозановская И.Н., Орлов Д.С., Садовникова Л.К. Экология и охрана биосферы при химическом загрязнении. – М., 1998.
- Нефедова Л.В. Структура базы данных по малой гидроэнергетике в рамках разработки ГИС «Возобновляемые источники энергии России». Труды 6-й между. н/т конф. «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве». Часть 4. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2008. – С. 314-322.
- Новаковский Б.А., Прасолова А.И., Киселева С.В., Рафикова Ю.Ю. Геоинформационные системы по возобновляемой энергетике. Труды 6-й между. н/т конф. «Энергообеспечение и энергосбережение в сельском хозяйстве». Часть 4. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2008. – С. 314-322.
- Пенджиев А.М. Геоинформационная технология использования возвратных вод Туркменского озера «Алтын асыр» // Альтернативная энергетика и экология – ISJAE. – 2014. – № 13. – С 129-150.
- Пенжиев А.М. Изменение климата и возможности уменьшения антропогенных нагрузок: монография. LAMBERT Academic Publishing, 2012.
- Пенджиев А.М. Экологические проблемы освоения пустынь: монография. LAP LAMBERT Academic Publishing, 2014. – 226 с.
- Пенджиев А.М. Планирование развития фотоэнергетики в Туркменистане // Экологическое планирование и управление. – 2007. – № 4.
- Пенджиев А.М. Ожидаемая эколого-экономическая эффективность использования фотоэлектрической станции в пустынной зоне Туркменистана // Альтернативная энергетика и экология – ISJAE. – 2007. – № 5. – С. 135-137.
- Пенджиев А.М., Пенжиев А.А. Международное сотрудничество в области охраны окружающей среды и устойчивого развития на основе возобновляемой энергетики в Центральной Азии // Альтернативная энергетика и экология – ISJAE. – 2012. – № 1. С 139-156.
- Пенджиев А.М. Эффективность использования ветроэлектростанций в Туркменистане // Проблемы освоения пустынь. – Ашхабад, 2004. – №1. – С. 20-25.
- Пенжиев А.М. Ветроэнергетика ресурсы Туркменистана. – Ашхабад: Стандарт, 2004. – №4. – С. 32-34.
- Пенджиев А.М. Возобновляемая энергетика и экология (обобщение статей) // Альтернативная энергетика и экология. – 2014. – № 08 (148). – С. 45-78.
- Пенджиев А.М. Механизм чистого развития: приоритеты энергоэффективности в Туркменистане // Альтернативная энергетика и экология. – 2009. – № 10 (78). – С. 142-148.
- Пенджиев А.М. Перспективы альтернативной энергетики и ее экологический потенциал в Туркменистане // Альтернативная энергетика и экология. – 2009. – № 9 (77). – С. 131-139.
- Пенджиев А.М. План действия и стратегия внедрения в возобновляемую энергетику // Альтернативная энергетика и экология. – 2013. – № 16 (138). – С. 39-60.
- Стребков Д.С., Пенджиев А.М., Мамедсахатов Б.Д. Развитие солнечной энергетики в Туркменистане: монография. – М.: ГНУ ВИЭСХ, 2012.
- Струков Д.Р. Проект системы медико-экологического мониторинга окружающей среды на базе ГИС. – URL: [www.gisa.ru](http://www.gisa.ru)
- Смирнов Б.М. Атмосфера Земли и энергетика. – М.: Знание, 1979.
- Федоров М.П., Романов М.Ф. Математические основы экологии. – СПб.: Издательство СПбГТУ, 1999. – 156 с.
- Использование солнечной энергии / под ред. профессора Рыбаковой Л.Е. – Ашхабад: Ылым, 1985.
- Парниковый эффект, изменение климата и экосистемы. – Л.: Гидрометиздат, 1989.
- Ресурсы и эффективность использования возобновляемых источников энергии в России. – М.: Наука, 2003.
- Шефтер Я.И. Использование энергии ветра. – М.: Энергоиздат, 1990.
- Первое Национальное сообщение по рамочной конвенции ООН об изменении климата. Фаза 2. Нарастание потенциала в приоритетных областях экономики Туркменистана в связи с изменением климата. Проект GF/2328-2724-4313 ЮНЕП / ГЭФ Туркменистан. – Ашхабад, 2006.
- Национальный план действий по охране окружающей среды. – Ашхабад, 2002.
- Устойчивое развитие Туркменистана (РПО + 10). – Ашхабад, 2002.
- URL: <http://www.gis.su>