



В. А. ЗУБАКИН
Доктор экон. наук,
профессор,
ГОУ ВПО «Российский
экономический
университет
им. Г.В. Плеханова»,
начальник
Департамента
координации
энергосбытовой
и операционной
деятельности
ПАО «ЛУКОЙЛ».
Область научных
интересов:
моделирование
и управление рисками
в энергетике.

E-mail:
zubakinva@gmail.com

Данная статья посвящена изучению непостоянства выработки электроэнергии возобновляемыми источниками. В силу природных особенностей генерации электроэнергии на объектах данного типа характерно наличие циклических колебаний, а также влияние случайных факторов. Наличие информации об основных закономерностях и способах моделирования выработки позволяет осуществлять подбор и выбор режимов работы электростанции таким образом, чтобы обеспечить потребителей максимальной качественной и бесперебойной энергией.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:

возобновляемый источник энергии, выработка электроэнергии, моделирование выработки, цикличность, стохастичность.



Н. М. КОВШОВ
Специалист,
факультет
математической
экономики,
статистики и
информатики
ГОУ ВПО
«Российский
экономический
университет
им. Г.В. Плеханова».
Область научных
интересов:
моделирование
и управление рисками
в энергетике

E-mail:
n.m.kovshov@gmail.com

Методы и модели анализа волатильности выработки ВИЭ с учетом циклическости и стохастичности

Одной из главных проблем возобновляемой энергетики на сегодняшний день является высокая волатильность (изменчивость) поступления энергии к электрогенерирующей установке. В силу природных особенностей это относится прежде всего к солнечной и ветроэнергетике, а также к гидроэнергетике. Непостоянство выработки электроэнергии сказывается на ее качестве, а также вызывает трудности при интеграции объектов ВИЭ в общую энергосистему.

Волатильность выработки в общем случае можно разбить на детерминированную и случайную составляющие. К детерминированной части относятся устойчивые циклические процессы, для которых характерны различные временные зависимости: сезонные, суточные и др. К случайной составляющей относятся различные сто-

хастические процессы, произвести прогноз которых чрезвычайно трудно, например сильные отклонения от среднескользящих наблюдений. Волатильность можно представить в виде следующего выражения:

$$V = CS,$$

где V – волатильность; C – цикличность; S – стохастичность.

Цикличность выработки электроэнергии ВИЭ

Гидроэнергетика

Ключевыми факторами в выборе режима работы любой ГЭС являются обеспеченность водой как основным рабочим ресурсом и общая нагрузка на энергосистему, т.е. активная мощность,

которую забирают все ее потребители, включая собственные нужды электростанции. К основным видам регулирования относят многолетнее, годовое, недельное и суточное. Для энергетики большое значение имеют недельное и особенно суточное регулирование, вместе с тем оно напрямую зависит от сезонных показателей водности. Водность понимается как количество воды, которое проносит река на определенном участке за отрезок времени, по сравнению с нормой для данного периода. Сезонная изменчивость колебаний водности в бассейнах рек затрудняет эффективное управление режимами работы ГЭС. Таким образом, сезонное прогнозирование водности становится чрезвычайно важным [Щавелев Д. С., 1981].

При планировании режимов работы ГЭС рассматривается несколько характерных циклов:

- период весеннего половодья (увеличение притоков);
- летне-осенняя межень (притоки начинают снижаться);
- особый зимний период (характерно образование ледяных заторов).

Существуют особенности в построении моделей для каждого периода. Прогнозы речного стока (объема воды, прошедшего через определенный створ за единицу времени) являются существенным элементом эксплуатации гидроэнергетических систем. Прогнозы обычно выпускаются как объемы стока за определенные периоды времени: год, сезон или месяц. Продолжительность такого периода зависит от характера спроса на воду и от количества воды в системе. Поскольку прогнозы для нужд водоснабжения составляются за более длительные промежутки времени, чем метеорологические прогнозы, неизбежны погрешности, поскольку не учитываются климатические явления, происходящие в прогнозируемый период, поэтому для некоторых переменных рекомендуется выпускать прогнозы с указанием вероятности превышения прогнозируемой величины [Руководство 2012].

Прогнозы для водоснабжения допустимо составлять с использованием следующих основных подходов:

- вероятностные прогнозы;
- анализ временных рядов;
- модели паводков и снеготаяния;
- прогнозы ледовых заторов;
- уравнения водного баланса;
- модели приливов и отливов.

Долгосрочные прогнозы, особенно сезонного стока, часто представляются в вероятностной форме – статистического распределения возможных значений стока в зависимости от слоя

осадков за предшествующие осень и зиму. Единственным источником неопределенности являются будущие погодные условия между датой подготовки прогноза и датой, на которую он выпускается. Такой прогноз стока, основанный на регрессионном уравнении, может иметь вид: $Q_{\text{сток}} = b_0 + b_1 \cdot R_{\text{осень}} + b_2 \cdot R_{\text{зима}} + b_3 \cdot R_{\text{весна}} + b_4 \cdot R_{\text{лето}}$ (1) где b_0, b_1, b_2, b_3, b_4 – коэффициенты регрессионного уравнения; R – сезонное распределение вероятностей осадков. Используется подход на основе исторических данных, поэтому желательно взять период наблюдений не менее 30 лет, чтобы получить репрезентативный ряд сочетаний.

Для установления прогностических зависимостей можно использовать одномерный анализ временных рядов. Один из таких подходов заключается в использовании модели авторегрессии и скользящего среднего ARMA (p, q) (autoregressive moving average), где p – авторегрессионные составляющие; q – скользящие средние, которая в общем виде выглядит:

$$y_t = \varphi_0 + \varphi_1 \cdot y_{t-1} + \varphi_2 \cdot y_{t-2} + \dots + \varphi_p \cdot y_{t-p} + \varepsilon_t - \theta_1 \cdot \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \cdot \varepsilon_{t-2} - \dots - \theta_q \cdot \varepsilon_{t-q} + u_t, \quad (2)$$

где y_t – результирующая переменная; φ_i – параметры авторегрессионной части модели, θ_i – параметры скользящего среднего; t – временной ряд; ε_t и u_t – значения ошибки [Тихомиров Н. П., Дорохина Е. Ю., 2003]. Эти модели хорошо подходят для бассейнов с ограниченными данными об осадках, поскольку для подготовки прогноза этого типа требуются только сведения о предшествующем расходе воды:

$$Q_{t+1} = a_0 Q_t + a_1 Q_{t-1} + a_2 Q_{t-2} + \dots + b, \quad (3)$$

где Q_{t+1} – прогноз объема стока с заблаговременностью в один временной шаг; Q_{t-i} – значения, измеренные до момента времени i . Коэффициенты a_i и b оцениваются посредством анализа временных рядов. Помимо прогнозируемой величины Q_{t+1} , модель временного ряда позволяет получить распределение возможных отклонений от прогнозируемой величины, а значит, можно легко вывести оценку погрешности прогноза. Для того чтобы прогноз среднемесячного стока по модели временного ряда был надежен, среднемесячный временной ряд должен иметь широкую автокорреляцию (зависимость между предыдущими значениями). Однако прогнозы обычно удается составить только на срок от одного до четырех месяцев.

Также в сезонном прогнозировании широко используются методы, основанные на моделях талого стока, которые основаны на метеорологических прогнозах. Прогнозы сезонных величин талого стока составляются для равнинных и для горных бассейнов, где талый сток представляет значительную часть суммарного речно-

го стока. Весенний сток многих рек составляет 50 – 70% годового стока. В частности, это основной источник подпитки российских рек, которые больше половины воды получают во время весеннего половодья.

Зависимость между суммарным талым стоком Q_n , где n – номер стока, и запасом воды в снежном покрове для равнинных территорий можно выразить теоретически:

$$Q_n = (w_n - f) \int_0^{w_n} f(y_d) dy_d - \int_0^{w_n - f} y_d f(y_d) dy_d \quad (4)$$

где w_n – водный эквивалент снега, мм; f – суммарная инфильтрация (проникновение атмосферных и поверхностных вод в почву), мм, за период снеготаяния; $f(y_d)$ – функция распределения площади в зависимости от слоя воды (y_d), необходимого для заполнения углублений на поверхности речного бассейна.

Количество воды, участвующей в формировании стока в период сезонного снеготаяния, рассчитывается для каждого года:

$$W = \bar{w} + \bar{P}, \quad (5)$$

где \bar{w} – средний для бассейна запас воды в снежном покрове в конце зимы, мм; \bar{P} – средняя величина осадков за период стока, мм.

В горных районах значительно различаются климат, почва и растительность вследствие существенного перепада высот, они же определяют характер формирования талого стока и водный режим водотоков. Главными источниками стока также являются сезонный снежный покров, который аккумулируется в горах в течение холодного сезона, и осадки, выпадающие в течение теплого сезона года. Длительность периода между началом и концом снеготаяния создает возможность для долгосрочного прогнозирования сезонного стока горных рек. Благодаря широкому распространению различных горных пород в горных бассейнах создаются условия, при которых величина потерь стока не может сильно изменяться год от года и существует хорошая зависимость между сезонным стоком и запасами снега в бассейне. Такая зависимость может быть установлена эмпирическим путем, если имеются данные наблюдений за ряд лет, тогда можно воспользоваться анализом временных рядов.

Многие реки и озера умеренных широт замерзают в зимний период. Условия замерзания характерны для больших рек, текущих в направлении полюсов, и для рек, вытекающих из больших озер и нижних бьефов гидроэлектростанций. Спрогнозировать речной сток в зимний период можно по формуле:

$$Q_{тс} = Q_0 - k_{л} T_{лед} \quad (6)$$

$Q_{тс}$ – речной талый сток; Q_0 – речной сток в день появления льда; коэффициент $k_{л}$ зависит от погодных условий в период замерзания; $T_{лед}$ –

продолжительность сохранения ледового покрова, день. Например, коэффициент k_0 для реки Амур может быть рассчитан по уравнению:

$$k_{л} = 0,005 - 0,00333 T_X, \quad (7)$$

где T_X – средняя температура воздуха в Хабаровске в октябре.

Для контроля выработки ГЭС и для прогнозов уровня воды широко применяются водные балансы рек и водохранилищ [Методические рекомендации, 2012; Методические указания, 2011]. Общий вид уравнения водного баланса:

$$P - E - Q_{пов} - Q_{подз} = \Delta Q, \quad (8)$$

где P – среднее значение слоя осадков; E – разность средних значений слоя испарения и слоя конденсации; $Q_{пов}$, $Q_{подз}$ – разность между оттоками и притоками поверхностных и подземных водотоков соответственно; ΔQ – разность между притоком и оттоком воды за период.

Уравнение водного баланса участка реки:

$$P_p + Q_{п.вер} + Q_{п.бок} + Q_{п.подз} - (Q_{о.ств} + E_{русл} + Q_{о.подз}) = \Delta Q, \quad (9)$$

где P_p – среднее значение слоя осадков на участок реки; $Q_{п.вер}$ – приток воды на данный участок реки через верхний створ; $Q_{п.бок}$ – боковой приток воды в реку (сток всех притоков, впадающих в реку); $Q_{п.подз}$ – приток подземных вод в реку; $Q_{о.ств}$ – отток воды через нижний створ реки; $E_{русл}$ – испарение с поверхности реки; $Q_{о.подз}$ – отток вод из русла реки подземным путем; ΔQ – изменение запаса воды на данном участке реки за расчетный интервал времени.

Уравнение водного баланса горного ледника для короткого интервала времени (месяц, сезон и т. д.) имеет вид:

$$P_{ледн} + Q_{мет.лав} + \Delta S_{тал} - Q_{о.лед} - E_{ледн} = \Delta Q_{ледн}, \quad (10)$$

где $P_{ледн}$ – количество выпавших за расчетный период на поверхность ледника твердых осадков; $Q_{мет.лав}$ – количество льда и снега, поступивших на поверхность ледника за счет лавин и метелевого переноса снега; $\Delta S_{тал}$ – количество талой воды, поступившей к леднику с прилегающих склонов гор и замерзшей в толще фирна (многолетнего замерзшего слоя снега); $Q_{о.лед}$ – отток вод от ледника за счет растаявшего снега и льда тела ледника и притока к нему талых вод с прилегающих склонов гор; $E_{ледн}$ – испарение с поверхности ледника; $\Delta Q_{ледн}$ – изменение общего запаса воды во льду и снеге горного ледника за рассматриваемый период.

На основе уравнений водного баланса можно получить прогнозируемое значение общего речного стока за период половодья Q :

$$Q = Q_{тс} + Q_{подз} + \bar{Q}_{дожд}, \quad (11)$$

где $Q_{тс}$ – прогноз талого стока; $Q_{подз}$ – значение подземного стока, вычисляемое как произведение прогнозного значения талого стока на коэф-

коэффициент подземного стока, $\overline{Q}_{\text{дожд}}$ – норма дождевой составляющей на спаде водостока.

Также необходимо отметить существование более длительных циклов с возможной длиной более десятилетия. Учет таких циклов будет принципиально важным при проектировании строительства новых объектов. В качестве примера представлена интегральная кривая годового притока воды в водохранилища Волжско-Камского каскада за 1959–2014 годы и его прогноз до 2028 года [Хазиахметов Т. Р., 2015]. Кривая показывает отклонения годового стока относительно нормы годового стока за многолетний период накопительным итогом, что позволяет выделять внутри этого периода многоводные и маловодные фазы и тем самым определять цикличность изменения водности. Прогноз построен исходя из того, что колебания водности носят периодический характер. В соответствии с прогнозом в среднем до 2029 года среднемноголетний сток Волги оценивается на уровне 239 км^3 при норме 264 км^3 , т.е. ожидается снижение водности на 10% относительно среднемноголетней величины (рис. 1).

Особым типом электростанций, использующих энергию воды, являются приливные электростанции (ПЭС), преобразующие энергию морских приливов в электрическую. Хотя выработка на таких станциях происходит лишь в течение ограниченного времени, тем не менее их работа хорошо прогнозируема.

Прилив вызывается силой притяжения Луны и Солнца. Морские приливы обычно чередуются с отливами теоретически через 6 ч 12 мин 30 с. Также выделяют сильный и слабый приливы очередностью 7 дней. Для приливных электростанций особое значение имеет разность уровней воды лагуны и моря. Потенциальная энергия растет с увеличением разницы в уровнях между лагуной и моря, реки или океана, а наиболее эффективными будут такие электростанции, у которых приливы и отливы достигают значительных величин. Таким образом, из предположения, что в году наблюдается приблизительно 706 полных приливных циклов, рассчитывают годовой запас потенциальной энергии приливного бассейна, кВт·ч:

$$\mathcal{E}_\Pi = 1,97 \cdot 10^6 A_{\text{ср}}^2 S, \quad (12)$$

где $A_{\text{ср}}^2$ – средняя величина прилива, м; S – площадь бассейна, м^2 [Бернштейн Л. Б., 1987].

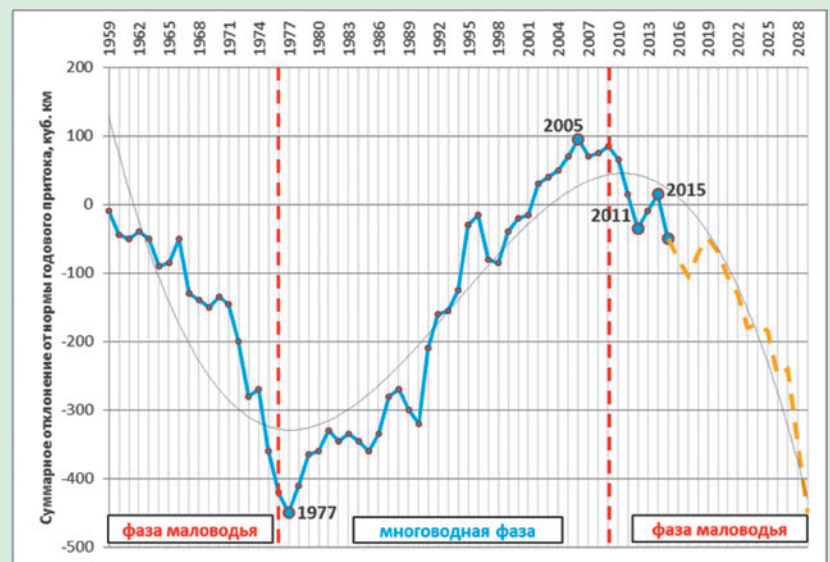
Ветроэнергетика

Помимо технических особенностей, основным параметром, который влияет на выработку электроэнергии на ветростанциях, является сред-

негодовая скорость ветра в регионе. Скорость ветра и ее цикличность зависят от множества факторов, для рассмотрения которых необходимо понять саму природу ветра.

Возникновение ветрового потока связано, прежде всего, с неравномерным нагревом поверхности Земли солнечным излучением. Вследствие разности теплового потенциала в различных частях Земли происходит перенос воздушных слоев в атмосфере. При рассмотрении карты глобального распределения скоростей ветра можно заметить, что все прибрежные зоны имеют достаточно высокие средние значения скоростей ветра. Это вызвано неравномерностью нагрева земной и водной поверхностей. Холодный воздух перемещается от воды к суше, а затем согретый легкий воздух поднимается над сушей. Этот же фактор объясняет причину падения интенсивности ветра от экватора к полюсам, где горячий воздух от сильно прогретой Солнцем поверхности Земли поднимается и направляется к полюсам, где, охладившись, опускается и движется обратно к экватору.

Рис. 1. Интегральная кривая годового притока воды реки Волги



Движение ветра может носить как глобальный, так и локальный характер, который связан с ортографическими особенностями местности. Таким образом, выделяют следующие основные признаки циркуляции воздушных масс:

- циркуляции в северном и южном полушариях (располагаются между 30° и 70° северной или южной широт и характеризуются движением теплого воздуха к полюсам и холодного воздуха к субтропикам);
- пассаты (околоэкваториальная циркуляция воздуха между 30° северной и южной ши-

рот на высоте от 1 до 4 км со средней скоростью 7 – 9 м/с);

- муссоны (устойчивые сезонные ветра с периодическим изменением направления: летом поток направлен от океана к суше, зимой – от суши к океану);

- местный ветер (характеризуется особенностями в структуре местности, а также разностью температур, например бриз «море – суша», горно-долинный ветер).

Приоритетными зонами для размещения ВЭС в плане ветроэнергетического потенциала являются прибрежные и долинны зоны.

Как было отмечено ранее, для прибрежных зон течение воздуха направлено от моря к суше. Поток воздуха может проникать в глубь суши на расстояние до 40 км. Скорость ветра может достигать 10 м/с. С максимальной скоростью поток обычно движется в ночное время. Земная поверхность остывает значительно быстрее, чем море, и, таким образом, поток тяжелого холодного воздуха направлен, как правило, от моря к суше.

Горы и большие массивы горных цепей также способствуют образованию мощных ветряных циркуляций. Свою роль играет и разность между температурой на дне долины и пиковой температурой на склоне горы. Прогретый воздух на склоне горы поднимается к вершине, а затем, остывая, уже холодный воздух течет обратно в долину. В долинах большой протяженности при благоприятном расположении Солнца могут развиваться достаточно высокие скорости ветра. Наслаиваясь на поток, вызванный прибрежной циркуляцией ветра, могут образовываться довольно сильные временные порывы ветра.

Принципиально важной характеристикой ветра, определяющей энергетическую ценность, является длительность скоростных порывов ветра. Продолжительность непрерывной длительности ветра в регионе зависит от множества метеорологических факторов и от влияния рельефа местности, а направление и скорость ветра во времени существенно изменяются.

Различают следующие виды колебаний ветра по их продолжительности:

- микрометеорологические колебания (продолжительность от доли секунды до нескольких минут);

- мезометеорологические колебания (продолжительность от нескольких минут до нескольких часов);

- синоптические колебания (вызываются циклонами и антициклонами, продолжительность около 4 суток);

- глобальные колебания (продолжительность от одной недели до месяца);

- междугодичные колебания (связаны с колебаниями радиационного баланса Земли, вызванными активностью Солнца).

Для работы ВЭС характерны краткосрочные, среднесрочные и долгосрочные режимы генерации энергии. Микро- и мезоколебания присущи краткосрочному режиму выработки энергии и оказывают существенное влияние на качество электроэнергии, генерируемой ВЭС. Наиболее сильно влияние колебаний данного типа сказывается на автономно работающих станциях. Скорость и направление ветра принято считать изменяющимися по случайному закону, поэтому мощность ВЭС в определенный короткий момент времени довольно трудно предсказать с высокой долей вероятности.

Остальные три вида колебаний являются существенными с точки зрения длительного обеспечения потребителей необходимыми объемами электричества и оказывают влияние на общую выработку за рассматриваемый период. Они представляют наибольший интерес, так как средние скорость ветра и частота распределения скоростей в течение года изменяются не сильно. Суммарная выработка ветроустановки за длительный промежуток времени (год и более) рассчитывается с высоким уровнем достоверности и может быть спрогнозирована [Елистратов В. В., 2013].

Междугодичный характер распределения скорости ветра во времени также является неравномерным. Характер этих изменений можно проследить на графиках скорости ветра для прибрежного города Хабаровска [Елистратов В. В., Кузнецов М. В., 2003], который, как и весь Дальний Восток, зависит от муссонной циркуляции (рис. 2, 3).

Таким образом, можно выделить следующие закономерности скорости ветра в разрезе суток и года:

- Среднемесячная скорость ветра увеличивается в связи с температурными перепадами весной и осенью. Зимой суша остывает гораздо быстрее океана, и формируется зимний муссон по направлению от суши к океану. Летом материк нагревается сильнее, и муссон движется от океана к суше. Средняя скорость ветра зимой, как правило, выше.

- Среднесуточная скорость достигает максимума в дневные часы. В летние месяцы наблюдается существенное увеличение скорости днем в результате дневного прогрева суши, ночью у земной поверхности ветер ослабевает. В зимние месяцы скорость ветра более постоянна в течение всего дня, с небольшим увеличением в дневные часы.

Подводя итог, можно сделать вывод, что для скорости ветра в одной и той же местности характерны сезонные и суточные вариации, причем имеют место как краткосрочные, так и долговременные тенденции. Поскольку в ветроэнергетических расчетах энергия ветра пропорциональна его скорости в кубе, ее определение и анализ метеорологических расчетов при подготовке проектов являются крайне важными. Приоритетным является определение изменения скорости ветра в среднем за месяц или сезон.

При рассмотрении моделей с точки зрения цикличности основным моделируемым показателем является повторяемость скоростей ветра $F(v)$, которая показывает, какую часть времени в течение рассматриваемого периода дули ветры с той или иной скоростью. Годовая повторяемость ветра достаточно часто, особенно в зарубежной практике, аппроксимируется распределением Вейбулла или ее модифицированным вариантом – распределением Вейбулла – Гудрича:

$$F(v) = k_{\Phi} \frac{v^{k-1}}{A^k} e^{-\left(\frac{v}{A}\right)^k}, \quad (13)$$

где k_{Φ} – параметр формы (зависит от района местности и в общем случае $k = 2$); A – параметр масштаба (зависит от средней скорости ветра, $A \approx 1,13 v$). Моделирование повторяемости скорости ветра на основе распределения Вейбулла на примере города Кемь-порт представлено на рис. 4.

Распределение Вейбулла – Гудрича является наиболее универсальным и общепризнанным методом моделирования скоростей ветра. С помощью данного подхода выполнено много разработок по районированию потенциальных ветроэнергетических ресурсов территории России и отдельных регионов [Елистратов В.В., 2013; Николаев В.Г., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И., 2008].

Солнечная энергетика

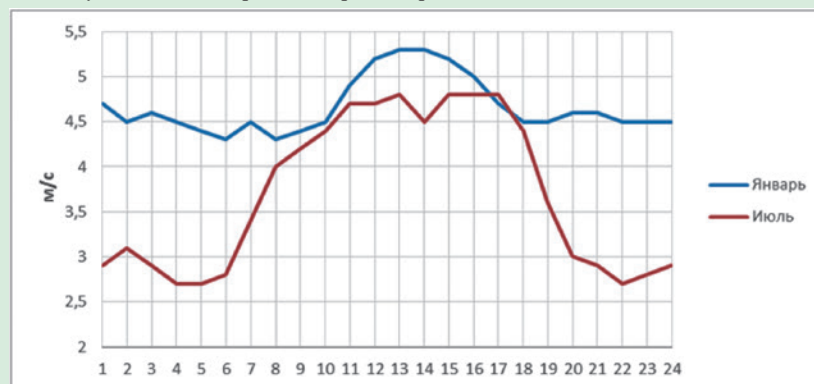
Перед началом изучения перспектив солнечного излучения для солнечной энергетики стоит отметить, что солнечное излучение оказывает огромное влияние на общую циркуляцию атмосферы. Теоретической основой этих взаимосвязей является наличие во многих земных гидрометеорологических процессах одиннадцатилетних или близких к ним циклов солнечной активности. Данный цикл, открытый Г. Швабе и подтвержденный Р. Вольфом, характеризуется относительным числом солнечных пятен (числами Вольфа), количество которых можно найти по формуле:

$$W = k_y(10h + f), \quad (14)$$

где k_y – коэффициент, зависящий от условий наблюдений; h – количество групп пятен на Солнце;

f – число пятен во всех группах. Приняв в качестве критерия приращение чисел Вольфа за год, благодаря ряду исследований можно обобщить те результаты, которые связывают между собой солнечную активность, объем речного стока и атмосферную циркуляцию ветра. На рис. 5 приведены многолетние изменения чисел Вольфа, приращения чисел, объем речного стока на примере реки Дон и повторяемости атмосферной циркуляции (на примере западного переноса ветра).

Рис. 2. Суточный ход скорости ветра, Хабаровск



Полученные данные наглядно подтверждают наличие корреляции между рассматриваемыми явлениями и общую природу этих процессов: расходы реки Дон, обусловленные повышенной солнечной активностью, составляют 93% от действительно произошедших, а для атмосферной циркуляции данное соответствие составляет 95,5% от ожидаемых [Николаев В.Г., Ганага С.В., Кудряшов Ю.И., 2008].

Выработка на солнечных электростанциях зависит от количества поступления солнечной радиации на приемники установки. Исходными данными для любых оценок распределения

Рис. 3. Годовой ход скорости ветра, Хабаровск

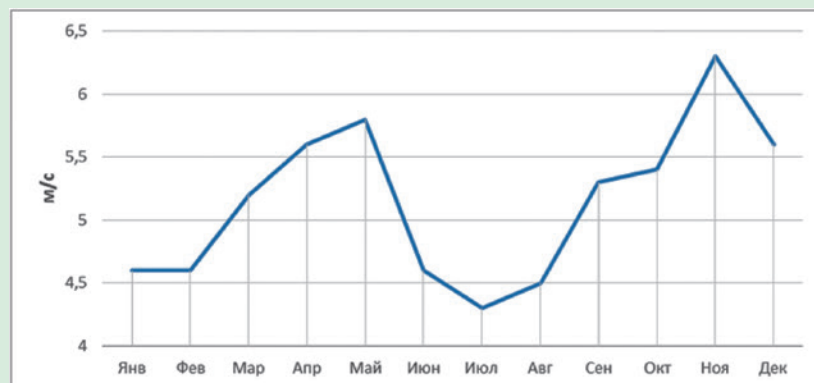
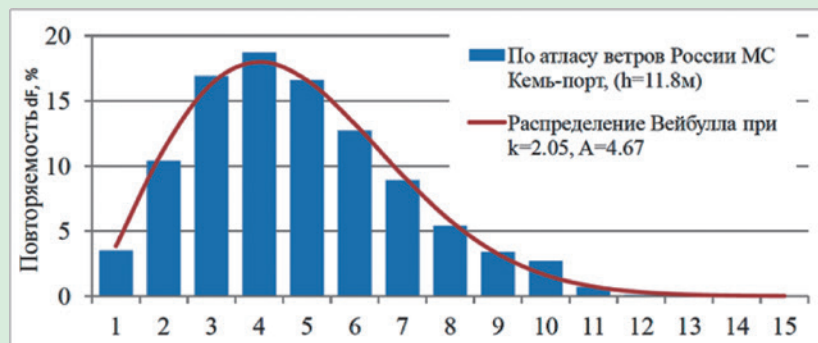


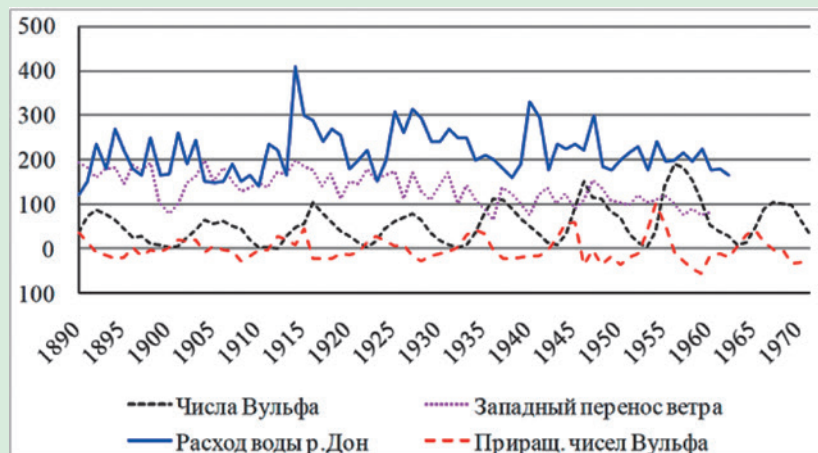
Рис. 4. Распределение скорости ветра по градациям



солнечной радиации являются данные наблюдений о суммарной, рассеянной и прямой радиации на актинометрических станциях, измеряющих величину излучения. Допустимо использовать данные различных масштабов: годовые, месячные, суточные, часовые; данные о суточном ходе солнечной радиации; продолжительности солнечного сияния для характерных дней года на основе многолетних наблюдений.

Общая карта распределения «технически применимой и экономически выгодной солнечной мощности» была разработана Б. П. Вейнбергом еще в 1920-х годах. Однако этих данных оказалось недостаточно для моделирования потенциально возможной выработки на солнечных электростанциях. Возникла необходимость в разработке солнечного кадастра на основе совокупности объективных численных и вероятностных характеристик, учитывающих закономерно стохастическую динамику поступления солнечной радиации и метеопараметров. Полученные характеристики лежат в основе построения математических моделей, правильный выбор которых

Рис. 5. Корреляция солнечной, ветровой и гидравлической (см. выше другую характеристику, где речь шла о гидроэнергетике) энергии



позволяет достоверно спрогнозировать объем поступления солнечной радиации на земную поверхность в предстоящий период.

Для измерения солнечной инсоляции применяется несколько подходов, каждый из которых обладает определенной степенью достоверности прогноза. Выделяют следующие методы:

- усреднение уровня солнечного излучения (используется средний показатель, например, за месяц, что позволяет оценить среднюю эффективность процесса; недостаток: эффективность в солнечных установках нелинейно зависит от солнечной радиации, что приводит к серьезным расхождениям);
- использование подробных фактических измерений (применяются ранее полученные данные о почасовых или суточных объемах солнечной радиации в данной местности для ожидаемой оценки эффективности процесса; метод является основным при моделировании процессов);
- обработка данных с помощью статистических методов (данные об объемах солнечной инсоляции представляются в более удобном виде; результирующие временные распределения используются для предсказания эффективности процесса преобразования энергии).

Совокупность солнечного излучения обычно выражается в калориях или ваттах на единицу поверхности за год. Весь поток солнечного излучения достигает поверхности в виде прямой, отраженной и рассеянной солнечной радиации.

Прямая солнечная радиация — лучи, идущие непосредственно от Солнца. Ее интенсивность (эффективность) определяют:

- высота стояния Солнца над горизонтом (максимум наблюдается в полдень, а минимум — утром и вечером);
- время года (максимум — летом, минимум — зимой);
- высота местности над уровнем моря (в горах излучение сильнее, чем на равнине);
- состояние атмосферы (загрязненность воздуха уменьшает интенсивность излучения).

От высоты стояния Солнца над горизонтом также зависит спектр солнечной радиации: чем ниже стоит Солнце над горизонтом, тем меньше ультрафиолетовых лучей.

Отраженная солнечная радиация — лучи Солнца, отраженные земной или водной поверхностью. Она выражается альбедо — процентным отношением отраженных лучей к их суммарному потоку. Величина альбедо зависит от характера отражающих поверхностей. При проектировании фотоэлектрического комплекса необходимо знать и учитывать альбедо поверхностей, на ко-

торых они будут располагаться. Некоторые из них характеризуются избирательной отражающей способностью, например снег полностью отражает инфракрасные лучи, а ультрафиолетовые – в меньшей степени.

Рассеянная солнечная радиация образуется в результате рассеивания солнечных лучей в атмосфере. Молекулы воздуха и взвешенные в нем частицы (мельчайшие капли воды, кристаллики льда и т.п.), называемые аэрозолями, отражают часть поступающих лучей. Солнечные лучи, достигающие земной поверхности в результате многократных отражений, являются рассеянными. Рассеиваются в основном лучи в ультрафиолетовом, фиолетовом и голубом спектрах, что определяет голубой цвет неба в ясную погоду. Удельный вес рассеянных лучей особенно велик в высоких широтах (в северных районах). Там Солнце стоит низко над горизонтом, и потому путь лучей к земной поверхности длиннее. На длинном пути лучи встречают больше препятствий и в большей степени рассеиваются.

Годовое распределение интенсивности рассеянного и прямого солнечного излучения для средней полосы России характеризуется ярко выраженным летним пиком и зимним провалом [Курбатов Н. Е., 2012]. Плотность потока представлена на рис. 6.

Наиболее часто измерения солнечного излучения сводятся к нахождению суммы потока прямой и рассеянной радиации, а также его плотности, последняя выражается в единицах измерения энергии за промежутки времени на единицу площади поверхности, к которой приложены солнечные лучи. Существующие модели можно разбить по следующим признакам:

- тип поверхности (наклонная или горизонтальная);
- фактор облачности (модели для ясного и облачного неба).

Мы рассмотрим преимущественно модели при условии ясного неба, относящиеся к детерминированной части.

Одним из наиболее распространенных универсальных методов расчета плотности потока суммарной солнечной радиации является статистическая модель Ангстрема. Модель связывает среднюю плотность потока солнечной радиации в ясный день и долю возможного числа часов солнечного сияния. Модель имеет общий вид:

$$H_{\text{ср}} = H_0 \left(a + b \frac{n_{\text{ср}}}{N} \right), \quad (15)$$

где $H_{\text{ср}}$ – среднее значение плотности потока радиации на горизонтальной поверхности, H_0 – плотность потока радиации на горизонтальной поверхности в ясные дни; $n_{\text{ср}}$ – среднесуточное число часов солнечного сияния, N – максималь-

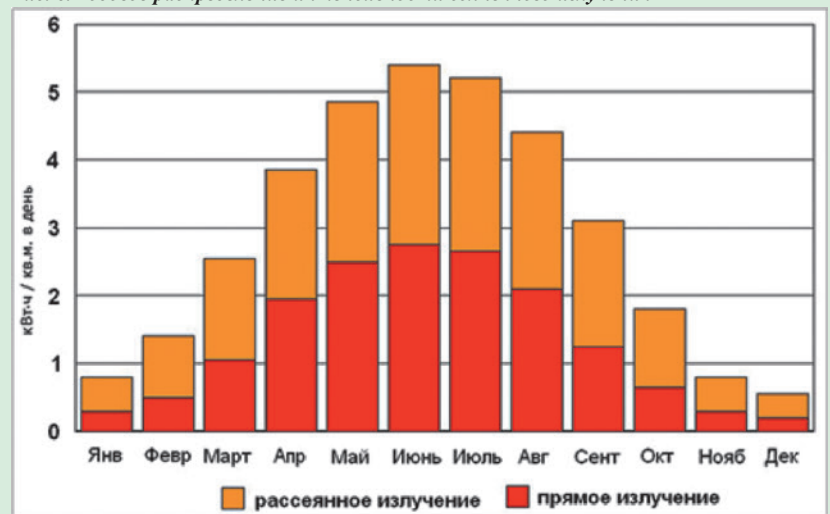
ное число часов солнечного сияния; коэффициент a – доля суммарной радиации, пропущенной облаками; коэффициент b – доля задержанной облаками суммарной радиации (коэффициенты находятся с помощью уравнения регрессии) [Попель О. С., Фрид С. Е., Киселева С. В. и др., 2010].

В качестве H_0 можно использовать плотность потока внеатмосферной солнечной радиации, усредненной за данный период времени. Параметры a и b изменяются в зависимости от координат местности.

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_{\text{ср}} \left(\left[1 + 0,0033 \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right] \left[\cos \varphi \cos \delta \sin \omega_s + \frac{2\pi \omega_s}{365} \sin \varphi \sin \delta \right] \right), \quad (16)$$

где $I_{\text{ср}}$ – солнечная постоянная (solar constant), в час; φ – широта местности; n – порядковый номер дня года; δ – склонение; ω_s – часовой угол восхода Солнца (solar).

Рис. 6. Годовое распределение интенсивности солнечного излучения



Склонение солнца можно вычислить следующим образом:

$$\delta = 23,45 \sin \left[360 \frac{284 + n}{365} \right], \quad (17)$$

Часовой угол вычисляется:

$$\cos \omega_s = -\tan \varphi \tan \delta. \quad (18)$$

Для расчета суточных сумм прямой и рассеянной солнечной радиации на горизонтальную поверхность для безоблачного неба может быть применена формула:

$$Q_{\text{возм}}^{\text{сут}} = \int_{t_{\text{солн}}^{\text{в}}}^{t_{\text{солн}}^{\text{з}}} [S_{\text{возм}}(t_{\text{солн}}) + D_{\text{возм}}(t_{\text{солн}})] dt_{\text{солн}}, \quad (19)$$

где $t_{\text{солн}}^{\text{в}}$ и $t_{\text{солн}}^{\text{з}}$ – истинное солнечное время восхода и захода Солнца, ч; $S_{\text{возм}}$ – прямая солнечная радиация для безоблачного неба, Вт/м²; $D_{\text{возм}}$ – рассеянная солнечная радиация для безоблачного неба, Вт/м²; $t_{\text{солн}}$ – истинное солнечное время, ч.

Когда поверхность приемника расположена под углом к горизонту, поступающее солнечное излучение состоит из прямой радиации, рассеянной солнечной радиации и солнечного излучения, отраженного от поверхности Земли, которую видит наклоненная поверхность приемника.

При достаточном количестве исходной информации величину суточной суммарной солнечной радиации на наклонную поверхность вычисляют по обобщенной модели:

$$Q_{\text{накл}}^{\text{сут}} = S_{\text{накл}}^{\text{сут}} + D'_{\text{накл}}^{\text{сут}} + D''_{\text{накл}}^{\text{сут}}, \quad (20)$$

где $S_{\text{накл}}^{\text{сут}}$ – суточная сумма прямой солнечной радиации на наклонную поверхность, Дж; $D'_{\text{накл}}^{\text{сут}}$ – суточная сумма рассеянной солнечной радиации на наклонную поверхность, отраженная небосводом, Дж; $D''_{\text{накл}}^{\text{сут}}$ – суточная сумма рассеянной солнечной радиации на наклонную поверхность от Земли, Дж.

Поток суммарной радиации от трех источников, падающий на наклонную поверхность в любой момент времени, может вычисляться:

$$H_T = H_{dr}R_{dr} + H_{df}\frac{1 + \cos s}{2} + (H_{dr} + H_{df})\frac{(1 - \cos s)\rho}{2}, \quad (21)$$

где H_{dr} , H_{df} – прямая и рассеянная (diffuse) составляющие солнечной радиации на горизонтальной поверхности, R_{dr} – поправочный коэффициент; s – угол наклона между рассматриваемой плоскостью и горизонтальной поверхностью; ρ – отражательная способность Земли (0,2 при отсутствии снега; 0,7 – при наличии снежного покрова).

Поправочный коэффициент можно найти:

$$R_b = \frac{\cos \theta_T}{\cos \theta_z} = \frac{\cos(\varphi - s) \cos \varphi \cos \delta \cos \omega_s + \sin(\varphi - s) \sin \delta}{\cos \varphi \cos \delta \cos \omega_s + \sin \varphi \sin \delta}, \quad (22)$$

где s – угол наклона между рассматриваемой плоскостью и горизонтальной поверхностью; ω – s – часовой угол.

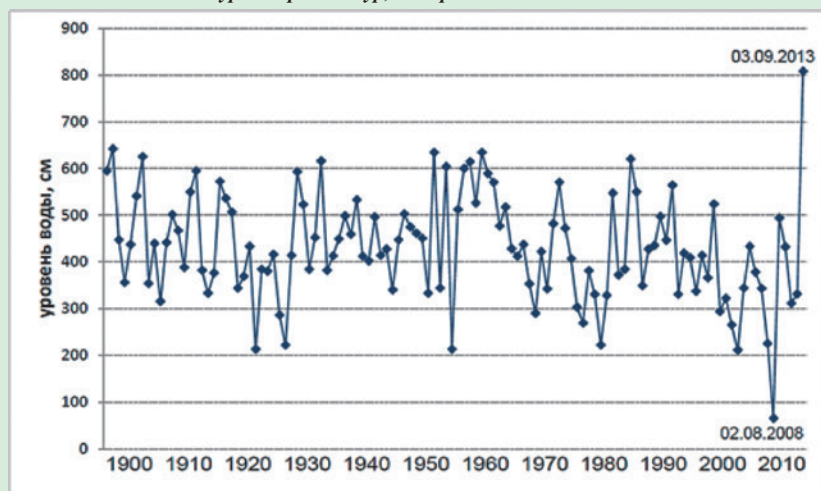
Гидроэнергетика

При рассмотрении водотоков к стохастическим событиям относятся труднопредсказуемые события, появление которых может быть совершенно нетипично не только для рассматриваемого сезона, но и в целом для данного региона. Ярким примером такого события является недавнее наводнение на Дальнем Востоке. Наводнение показало, что текущая технологическая база метеорологических служб не в состоянии заблаговременно обеспечить прогноз катастрофических дождей паводков. Долгосрочный прогноз паводков сложен главным образом из-за сильного влияния циклонов, период относительно точного прогноза составляет не более 10 – 14 дней. Так, прогноз выпавшего количества осадков в Амурской области в июне и августе оправдался, а прогноз на июль, когда сложились все предпосылки для экстремального развития паводков на реках бассейна Амура, не оправдался. Особенность наводнения 2013 года заключается в том, что высокие дождевые паводки наблюдались во всех основных притоках Амура, смещающийся паводок западной части принял на своем максимуме паводки рек с восточной части. Ситуация усугублялась продолжающимися дождями. В общей сложности суммарные осадки оказались практически в три раза выше нормы для данного участка. За период наблюдений (около 120 лет) отмечались ярко выраженные многоводные и маловодные периоды, однако строгая цикличность в их смене не прослеживалась (рис. 7) [Гаркин А. С., Кореню И. Ю., Казачинский С. А., 2014].

Что касается сезонных стохастических событий, то в качестве примера можно привести зимние паводки. Один из таких произошел на Кубани в 2002 году. Стоит отметить, что последние похожие зимние наводнения наблюдались в этом регионе только в 1932 – 1966 годах. Называются следующие причины такого необычного явления в середине января: превышение запасов снега в 2 – 3 раза, сильнейший ветер и аномальное похолодание в предшествующий период, что повлекло образование ледяного поля на реках Кубань, Проток и в Азовском море. Само наводнение произошло в результате резкого повышения температуры воздуха, выпадения осадков в виде ливней (до трех месячных норм в течение 2 – 3 дней) и интенсивного таяния снега [Воробьев Ю. Л., Акимов В. А., Соколов Б. И., 2003].

Становится очевидным, что прогнозировать данные события с помощью математических моделей чрезвычайно сложно. Тем не менее предпринимались попытки создать универсальные способы моделирования водотоков, которые бы

Рис. 7. Максимальные уровни реки Амур, Хабаровск



учитывали, например, чередование многолетних маловодных и многоводных периодов. В практике гидрологических расчетов наибольшее распространение получили функции распределения в виде трехпараметрического гамма-распределения, которое также называется распределением Крицкого – Менкеля. Оно достаточно гибко и удовлетворительно описывает многие практически необходимые характеристики стока. Функция этого распределения применительно к расходу имеет вид:

$$F(Q, \bar{Q}, b, \gamma) = \frac{\Gamma(\gamma + b)^{\frac{\gamma}{b}}}{\bar{Q} \Gamma(\gamma)} \cdot \frac{1}{\Gamma(\gamma) |b|} \cdot \int_0^Q Z^{\frac{\gamma}{b} - 1} \left(\frac{Z^{\gamma+b}}{e^{\bar{Q} \Gamma(\gamma)}} \right)^{\frac{1}{b}} dz, \quad (23)$$

где Q – расход (речной сток); \bar{Q} – математическое ожидание расхода; γ и μ – параметры, определяемые через коэффициент вариации и коэффициент асимметрии; Z – переменная интегрирования; $\Gamma(\gamma)$ – гамма-функция.

Базой для статистической оценки параметров распределения является анализ многолетних данных гидрологических наблюдений, качество оценки прямо зависит от периода этих наблюдений. Хорошие показатели достигаются на основе наблюдений, длина которых исчисляется десятками лет. На основе полученной случайной выборки выполняется оценка функции распределения, также являющейся случайной величиной. Математический аппарат таких методов моделирования речного стока способен предоставить достоверные результаты при наличии длинных рядов наблюдений, однако его применение затрудняется при создании энергетических комплексов на малых реках, период наблюдения за стоком которых ограничен. В таких случаях пренебрегают многомерностью распределения и пользуются более простыми прогнозными моделями, которые основаны на методе Монте-Карло, таблицах Фостера или методе аналогий, заключающемся в использовании параметров реки со схожими гидрологическими характеристиками [Елистратов В.В., 2013; Методические указания, 2011].

Солнечная энергетика

Ранее отмечалось, что моделирование поступления солнечного излучения на земную поверхность целесообразно разбить на две части:

- детерминированную часть (расчет дневных сумм солнечной радиации для безоблачного неба);
- стохастическую часть (определение коэффициента ослабления солнечной радиации облачностью или модель облачности).

Моделирование процесса образования облаков является многофакторной задачей. Об-

лачность принято представлять как случайную величину с законом распределения, соответствующим реальным статистическим данным актинометрических и метеорологических наблюдений. Например, в некоторых работах экспериментальные наблюдения наилучшим образом описываются β -законом с соответствующими параметрами распределения.

Однако учесть все факторы, влияющие на процесс образования облаков и фронтов, в какой-либо одной модели невозможно. Зачастую единственными источниками, на которых может основываться прогноз, являются многолетние статистические картографические данные месячных сумм суммарной среднесуточной солнечной радиации и измеряемые метеоданные на месте расположения измерительного устройства [Бирюков Е. В., Манусов В. З., 2006]. Такой прогноз может быть реализован следующим образом. На основании теоретического графика поступления солнечной энергии для безоблачного неба $S_{\text{бн}}(t)$ и картографических данных среднесуточной инсоляции $S_{\text{стат}}$ для данного географического места за каждый месяц можно построить усредненный график через введение соответствующего коэффициента, который определяется следующим образом:

$$k = \frac{\bar{S}_{\text{стат}}}{\int_{t_b}^{t_3} S_{\text{бн}}(t) dt} = \frac{\bar{S}_{\text{стат}}}{Q_{\text{возм}}^{\text{сут}}}, \quad (24)$$

где $Q_{\text{возм}}^{\text{сут}}$ – величина дневной суммы суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность для безоблачного неба; t_b , t_3 – время восхода и захода Солнца.

Тогда усредненный график рассчитывается:

$$S_{\text{ср}}(t) = k \cdot S_{\text{бн}}(t). \quad (25)$$

При таком подходе предполагается, что общий вид функциональной зависимости поступления инсоляции для безоблачного неба и общий вид функциональной зависимости поступления инсоляции для облачного неба одинаковы. Так как коэффициент k в течение суток – величина непостоянная, может быть похожим образом предусмотрена корректировка коэффициента k на основании оперативных данных поступления энергии $S_{\text{оп}}(t)$. При $|S_{\text{оп}}(t) - S_{\text{ср}}(t)| > \delta_{\text{откл}}$, где $\delta_{\text{откл}}$ – допустимое отклонение, вычисляется новое значение k [Симанков В.С., Бучацкий П.Ю., Шопин А.В., 2002]:

$$k = \frac{S_{\text{оп}}(t)}{S_{\text{бн}}(t)}. \quad (26)$$

Временные интервалы t , через которые происходит корректировка графика солнечной радиации, определяют исходя из необходимой точности и долгосрочности прогноза, степени устойчивости поступления солнечной энергии.

Ветроэнергетика

Знания о сезонных закономерностях и высоких средних значениях скоростей ветра в регионе все еще не гарантируют их эффективного использования. В ветроэнергетике огромное значение имеет знание возможной длительности затиший и иных экстремальных значений скорости ветра, которые являются основным стохастическим фактором при моделировании. Их вероятностная оценка служит основным критерием эффективности использования ветровой энергии. Затишьем считается период неактивных скоростей ветра, которые не могут быть использованы для производства энергии. Довольно длительные затишья могут наблюдаться и в местностях со значительными по интенсивности ветрами. При наличии такой возможности наиболее точным вариантом прогноза об изменении ветра во времени остаются данные многолетних наблюдений за ветровыми характеристиками в исследуемой области, статистические характеристики ветра из аэроклиматических справочников пограничного слоя атмосферы. Чаще всего имеется информация о среднемесячных, среднегодовых скоростях ветра и их экстремальных значениях за рассматриваемый период.

Для максимально точного моделирования прихода ветровой энергии с учетом стохастичности в тех районах, исходной статистической информации о которых недостаточно, необходимо определить распределение скоростей ветра во времени по градациям и по высоте. Однако в ветроэнергетике, в отличие, скажем, от гидроэнергетики, очень велико влияние местных особенностей формирования ветрового режима, поэтому попытки создать универсальные модели распределения могут не обеспечить требуемую точность, хотя и имеют достаточно широкую практику применения, чаще всего из-за недостатка фактических данных наблюдений.

Одним из примеров специализированной модели является распределение для ветров Средней Азии, предложенное Г. А. Гриневичем:

$$F(v, \bar{v}, \Delta v) = \frac{\Delta v}{v} a_{\text{мест}} \left(\frac{v^p}{\bar{v}} \right) e^{-k \left(\frac{v}{\bar{v}} \right)}, \quad (27)$$

где $F(v, \bar{v}, \Delta v)$ – специализированная повторяемость скоростей ветра; \bar{v} – средняя скорость за расчетный промежуток; v – скорость, относительная повторяемость которой определяется в интервале от $(v - \Delta v/2)$ до $(v + \Delta v/2)$; Δv – значение выбранной градации скорости ветра. Значения коэффициента $a_{\text{мест}}$ и показателей степеней p характеризуют местные особенности ветрового режима и могут меняться в достаточно широких пределах. Данная модель позволяет одновременно учитывать большее количество различных факторов, а также создавалась с учетом особенностей определенной области. Следовательно, можно более точно описать процесс, другими словами, большую долю изменчивости. Доля неопределенности в специализированных моделях становится ниже [Елистратов В. В., 2013].

Распределение скорости ветра по высоте при высоких скоростях и достаточно однородной поверхности может быть аппроксимировано степенной функцией вида:

$$U(H) = U_{\phi} \left(\frac{H}{h} \right)^m, \quad (28)$$

где $U(H)$, U_{ϕ} – скорости ветра на высоте H и высоте флюгера h ; показатель степени $m=f(U)$ в общем случае зависит от скорости ветра, рельефа местности и шероховатости поверхности [18]. При ветроэнергетических расчетах показатель степени m принимают по следующей зависимости от скорости ветра (табл. 1).

Для систематизации материала, полученного в предыдущих пунктах, была составлена справочная табл. 2. Таблица содержит: основные факторы цикличности и стохастичности со стороны производства и потребления, исходные параметры, с помощью которых можно смоделировать эти процессы, а также сами типы применяемых моделей.

Существующие методы, описанные в данной статье, позволяют довольно точно моделировать процессы выработки электроэнергии и включают в себя: регрессионные модели, балансовые уравнения и вероятностные распределения. Моделирование стохастической составляющей является более сложной задачей, качество результатов которой практически во всех случаях определяется длительностью наблюдений и чаще всего моделируется с помощью специализированных функций распределения. Наличие информации о циклических закономерностях выработки позволяет подбирать генерирующее оборудование возобновляемых источников энергии таким образом, чтобы осуществлять снабжение населения

Таблица 1

Значения показателя m в зависимости от скорости ветра

Скорость ветра на высоте флюгера U_{ϕ} , м/с	Показатель степени m
0–3	0,35
3,5–4,0	0,25
4,0–4,5	0,20
5,5–6,0	0,18
6,0–11,5	0,14
12,0–12,5	0,13
13,0–15,0	0,125
>15,0	0,12

Таблица 2
Результаты исследования

Цикличность			
	Факторы	Возможные исходные параметры	Применяемые модели
Гидроэнергетика	<ul style="list-style-type: none"> Сезонные изменения речного стока (обусловлены чередованием времен года: минимум зимой, максимум летом); весенние паводки и летне-осенняя межень (повышение притоков воды в связи со снеготаянием и понижение вследствие замерзания); приливы и отливы (вызваны цикличностью лунной активности и ветров); многолетние гидрологические циклы 	<ul style="list-style-type: none"> Объемы речного стока; средняя величина/распределение вероятностей осадков; продолжительность периода ледяного покрова; величина прилива (высота уровня воды) 	<ul style="list-style-type: none"> Различные формы регрессионных моделей для речного стока; модели ARIMA; вероятностные модели; уравнения водного баланса
Ветроэнергетика	<ul style="list-style-type: none"> Циркуляции в северном и южном полушариях (теплый воздух направлен к полюсам, холодный к субтропикам); околоэкваториальная циркуляция (равномерные воздушные течения – пассаты); муссонные ветра (в связи с разностью температур летом направлены от океана, зимой от суши); горно-долинные ветра (теплый воздух со склона направлен вверх, холодный с долины вниз); суточные циклы (увеличение скорости днем и снижение ночью) 	<ul style="list-style-type: none"> Средняя скорость ветра; географические координаты 	<ul style="list-style-type: none"> Аппроксимации функции распределения повторяемости скоростей (распределение Вейбулла – Гудрича)
Солнечная энергетика	<ul style="list-style-type: none"> Циклы солнечной активности (увеличения и уменьшения обусловлены количеством пятен на Солнце, 11-летний цикл); сезонный цикл (обусловлен вращением Земли вокруг своей оси: максимум летом, минимум зимой) дневной цикл (обусловлен высотой нахождения Солнца над горизонтом: максимум в полдень, минимум вечером и утром) 	<ul style="list-style-type: none"> Объемы прямой и рассеянной солнечной радиации; угол склонения Солнца; широта местности; угол наклона к горизонту; число ясных дней; средняя плотность потока солнечной радиации в ясный день; истинное солнечное время 	<ul style="list-style-type: none"> Регрессионные модели (модель Ангстрема); модели дневных сумм солнечной радиации для безоблачного неба (для прямой и наклонной поверхности)
Стохастичность			
Гидроэнергетика	<ul style="list-style-type: none"> Различные нетипичные для рассматриваемого участка события, связанные с: расхождением средней величины осадков от нормы, аномально теплой погодой для зимы, наводнениями, засухой, зимними паводками 	<ul style="list-style-type: none"> Объемы расхода воды в водотоке; усредненные значения расхода воды 	<ul style="list-style-type: none"> Функции распределения (Крицкого – Менкеля); таблицы Фостера; метод Монте-Карло
Ветроэнергетика	<ul style="list-style-type: none"> Затишья ветра; экстремально высокие скорости ветра 	<ul style="list-style-type: none"> Средняя скорость ветра; повторяемость скоростей ветра; скорость ветра на высоте; параметры формы местности 	<ul style="list-style-type: none"> Специализированные функции распределения ветра с учетом местности; функции распределения ветра по градициям и высоте
Солнечная энергетика	<ul style="list-style-type: none"> Наличие облачности (процесс образования облаков является стохастическим, а их наличие уменьшает количество поступающей солнечной радиации на поверхность Земли) 	<ul style="list-style-type: none"> Теоретические объемы поступления солнечной радиации при безоблачном небе; картографические данные среднесуточной инсоляции 	<ul style="list-style-type: none"> Функции распределения (β-распределение); модель с использованием ослабляющего коэффициента облачности

качественной электроэнергией, путем снижения ее волатильности совместным использованием с другими генерирующими станциями. Полученные данные об особенностях волатильности выработки также могут быть использованы при

дальнейшем изучении совместных режимов работ электростанций различного типа, и, кроме того, учитываться при долгосрочном планировании поставок сырья на станции, работающие на углеродном топливе.

Список литературы:

1. **Щавелев Д. С.** Гидроэнергетические установки (гидроэлектростанции, насосные станции и гидроаккумулирующие электростанции). Л.: Энергоиздат, 1981. 520 с.
2. Руководство по гидрологической практике: 6-е изд. Женева: ВМО, 2012. Т. II: Управление водными ресурсами и практика применения гидрологических методов. 324 с.
3. **Тихомиров Н. П., Дорохина Е. Ю.** Эконометрика: Учебник. М.: Экзамен, 2003. 512 с.
4. Методические рекомендации по определению расчетных гидрологических характеристик при наличии данных гидрометрических наблюдений. СПб.: ГГИ, 2012. 124 с.
5. Методические указания по разработке правил использования водохранилищ. Утв. Приказом Минприроды РФ от 26.01.2011 № 17.
6. **Хазиахметов Т. Р.** Сценарии развития половодья на Волжско-Камском каскаде в 2015 году: Доклад / ОАО «Русгидро». М., 2015. URL: http://www.rushydro.ru/upload/iblock/1bf/Stsenarii-razvitiya-polovodya-na-Volzhsko-Kamskom-kaskade-v-2015-godu_lektsiya_T_Haziahmetova.pdf.
7. **Бернштейн Л. Б.** Приливные электростанции. М.: Энергоатомиздат, 1987. 296 с.
8. **Елистратов В. В.** Возобновляемая энергетика. 2-е изд., доп. СПб.: Наука, 2013. 308 с.
9. **Елистратов В. В., Кузнецов М. В.** Теоретические основы нетрадиционной и возобновляемой энергетики: Методические указания: СПб.: Изд-во СПбГПУ, 2003. Ч. 1. Определение ветроэнергетических ресурсов региона. 55 с.
10. **Николаев В. Г., Ганага С. В., Кудряшов Ю. И.** Национальный кадастр ветроэнергетических ресурсов России и методические основы их определения. М.: Атмограф», 2008. 584 с.
11. **Курбатов Н. Е.** Использование возобновляемых источников энергии в условиях Забайкалья: естественные среды в качестве аккумуляторов солнечной энергии. Чита: ЗабГУ, 2012. 154 с.
12. **Попель О. С., Фрид С. Е., Киселева С. В. и др.** Климатические данные для возобновляемой энергетики России (база климатических данных): Учеб. пос. М.: Изд-во МФТИ, 2010. 56 с.
13. **Гаркин А. С., Кореню И. Ю., Казачинский С. А.** Наводнение-2013. Талакан: Русгидро, 2014. 144 с.
14. **Воробьев Ю. Л., Акимов В. А., Соколов Б. И.** Катастрофические наводнения начала XXI века: уроки и выводы. М.: ООО «ДЭКС-Пресс», 2003. 352 с.
15. **Бирюков Е. В., Манусов В. З.** Краткосрочное прогнозирование электрической нагрузки на основе нечеткой нейронной сети и ее сравнение с другими методами // Известия ТПУ. 2006. № 6. URL: http://cyberleninka.ru/journal/n/izvestiya-tomskogo-politehnicheskogo-universiteta?issue_id=200130#issues-list-title.
16. **Симанков В. С., Буцацкий П. Ю., Шопин А. В.** Моделирующий комплекс поступления энергии для оперативного управления автономными фотоветроэнергетическими системами // Труды Физического общества Республики Адыгея. Майкоп, 2002. № 7. С. 13 – 21.
17. **Безруких П. П.** Ветроэнергетика: Справ. и метод. пос. М.: ИД «Энергия», 2010. 320 с.