

УДК 551.594.2

Изменчивость ресурсов солнечной и ветровой энергии в российском секторе Арктики

К.Н. Пустовалов^{1,2}, Е.В. Харюткина¹, В.А. Корольков¹, П.М. Нагорский^{1,2*}

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН
634055, г. Томск, пр. Академический, 10/3

²Национальный исследовательский Томский государственный университет
634050, г. Томск, пр. Ленина, 36

Поступила в редакцию 25.06.2019 г.

По данным наблюдений на метеорологических станциях и данным реанализа были получены оценки сезонно-суточных величин суммарной радиации и скорости ветра в российском секторе Арктики за временной интервал с 1987 по 2016 г. Выявлено, что поток суммарной солнечной энергии достигает пиковых значений в июне (7–8 кВт · ч/м²), при этом в летние месяцы при перемещении с запада на восток отмечается его общее увеличение. Получено, что средняя величина скорости ветра в регионе составляет 4–6 м/с и не изменяется значительно в течение года. Минимальные значения скорости ветра от зимы к лету увеличиваются, а максимальные уменьшаются.

Ключевые слова: Арктика, возобновляемые источники энергии, солнечная радиация, скорость ветра; Arctic, renewable energy sources, solar radiation, wind speed.

Введение

В Российской Федерации 20% территории, или 3 млн км², лежит к северу от Полярного круга [1]. Российская Арктика — это регион с высокой степенью урбанизации, доля населения которого составляет менее 2% от общей численности населения России, при этом доля их суммарного потребления электроэнергии 3,6% [2]. В связи с этим все более актуальным для этого региона становится вопрос о комплексном развитии энергетической инфраструктуры, которая позволила бы обеспечить комфортные условия работы и проживания и минимизировать антропогенное воздействие на окружающую среду [3]. В Арктике есть свои сложности при использовании большей части видов углеводородных энергоресурсов из-за суровых климатических условий с резкими штормовыми ветрами и низкими температурами [4].

Развитие возобновляемых источников энергии — мировая тенденция, обусловленная экономическими, социальными и экологическими причинами, в том числе проблемой изменения климата и снижения выбросов парниковых газов [1]. Использование подобных источников энергии не связано с увеличением содержания парниковых газов в атмосфере, однако ресурсы такой энергии и эффективность соответствующих энергетических установок зависят от изменения климата [5]. Одним из способов снижения затрат на доставку топлива в удаленные районы и повышения надежности их энергоснабжения является

использование местных энергоресурсов — ветра, солнца, энергии малых рек.

Для оценок таких возможностей необходимы надежные данные о текущем климатическом состоянии и изменениях в Арктике. В настоящее время такой мониторинг осуществляется с помощью сети гидрометеорологических станций, спутниковых, судовых наблюдений, а также наблюдений на автономных буйковых станциях.

Для ветровых и солнечных энергетических ресурсов основной источник данных — многолетние наземные актинометрические и метеорологические измерения в заданном регионе [6], а также результаты обработки данных реанализа и математического моделирования [7–9], представленные в глобальных базах данных.

В высоких широтах (выше 75°) скорость приземного ветра увеличивается, как и скорость ветра над океанами. В российском секторе Арктики перспективно развивать ветроэнергетику, поскольку средняя скорость ветра составляет 6–7 м/с [4]. Например, на юго-восточном побережье Чукотки средняя годовая скорость ветра достигает 6–9 м/с — это самые высокие среднегодовые показатели в России. По потенциалу ветровой энергии выгодно отличается от других регионов страны и Мурманская обл. — одно из самых ветреных мест на европейском севере России (среднегодовая скорость — 6–8 м/с) [10]. Оптимальным вариантом использования энергии ветра и замещения привозного дизельного топлива является сооружение гибридных ветродизельных и/или ветроаккумулирующих электростанций.

Имеются также благоприятные условия для солнечной энергетики: среднегодовое дневное поступление прямого солнечного излучения в Арктике

* Константин Николаевич Пустовалов (const.pv@yandex.ru); Елена Валерьевна Харюткина (kh_ev@imces.ru); Владимир Александрович Корольков (kor@imces.ru); Петр Михайлович Нагорский (npm_sta@mail.ru).

составляет от 2 до 5 кВт·ч/м² [4]. В некоторых районах, например в Якутии, в летний период поступление солнечной энергии может достигать 6–8 кВт·ч/м², что соизмеримо с величиной этого показателя в южных районах России [1]. В некоторых районах Российской Арктики наметилась тенденция уменьшения прямой и суммарной радиации. Наиболее ярко это проявляется в Средней Сибири [5].

Согласно существующим оценкам наблюдаемых и ожидаемых изменений климата можно полагать, что последние не окажут существенного негативного влияния на выработку энергии на основе возобновляемых источников. Таким образом, богатый ветроэнергетический потенциал во многих районах России создает все предпосылки для ускоренного развития и внедрения ветроэнергетических станций и установок [5].

Цель настоящей работы — проанализировать пространственно-временные изменения сезонно-суточных величин суммарной радиации и скорости ветра для оценки возможности их использования в качестве возобновляемых источников энергии в Российской Арктике.

1. Использованные данные и их обработка

Исследование проведено для Российской Арктики на 30-летнем интервале (1987–2016 гг.), который, согласно ВМО, является достаточным для получения достоверных климатических характеристик. Для оценки изменчивости ветра использованы данные о его скорости на высоте 10 м в стандартные метеорологические сроки на восьми полярных гидро-

метеорологических станциях (ГМС), расположенных к северу от Северного полярного круга и практически равномерно распределенных по исследуемой территории (рис. 1) [11].

На первом этапе исследования изменчивости скорости ветра в российском секторе Арктики проводился квантильный анализ, заключающийся в расчете для каждой ГМС медианных значений скорости ветра, а также значений 0,05 и 0,95 квантилей, представляющих собой минимальные и максимальные значения скорости ветра при доверительной вероятности $p = 95\%$, в каждый стандартный срок в течение года по данным за 30 лет. На втором этапе вычислялась повторяемость периодов различной продолжительности (в метеорологических сроках) со скоростью ветра менее 1,5 м/с, являющейся нижним пределом рабочей скорости большинства ветрогенераторов.

Для оценки изменчивости суммарной солнечной радиации на рассматриваемой территории использованы среднемесячные значения по данным реанализа ERA-Interim с пространственным разрешением $1,125^\circ \times 1,125^\circ$ (<http://www.ecmwf.int/en/research/climate-reanalysis/era-interim>). Данные реанализа характеризуются достаточным охватом изучаемой территории и отсутствием пропусков во временных рядах.

Исследование изменчивости солнечной радиации осуществлялось в два этапа. Сначала по данным для восьми узлов, соответствующих положению перечисленных выше ГМС, рассчитывались медианные, минимальные и максимальные (при $p = 95\%$) значения потока суммарной солнечной радиации. Затем, на основе данных реанализа в узлах на фиксированных широте 70 и 80° с.ш. и долготе от 30° в.д.

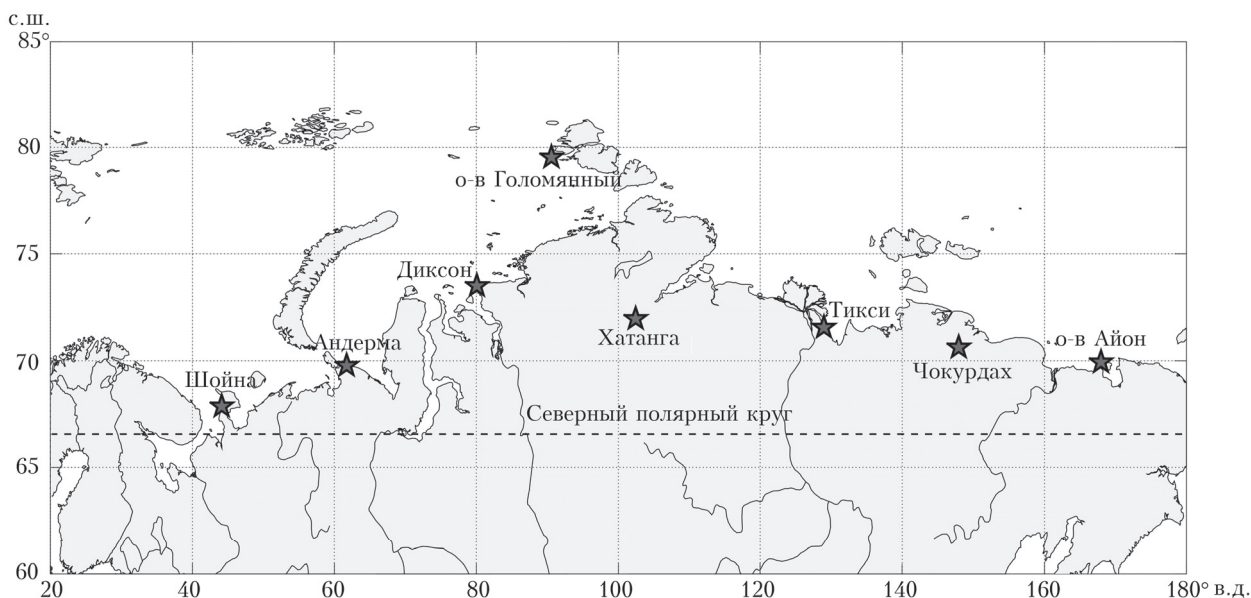


Рис. 1. Расположение полярных гидрометеорологических станций в Российской Арктике, данные которых использованы в исследовании: Шойна (северо-восточное побережье Белого моря), Амдерма (юго-западное побережье Карского моря), Диксон (юго-восточное побережье Карского моря), о-в Голомянный (арх. Северная Земля), Хатанга (юго-запад моря Лаптевых), Тикси (юго-восточное побережье моря Лаптевых), Чокурдах (юго-запад Восточно-Сибирского моря), о-в Айон (юго-восток Восточно-Сибирского моря)

до 170° з.д. с шагом 10° оценивались меридиональные изменения минимальных значений потока суммарной солнечной радиации в пределах российского сектора Арктики.

2. Полученные результаты и их анализ

2.1. Анализ изменчивости ветра

В Российской Арктике (рис. 2) в целом медианные значения скорости ветра в регионе составляют 4–6 м/с и не изменяются значительно в течение года. В то же время минимальные (при $p = 95\%$) значения скорости ветра от зимы к лету на большинстве станций (исключения — Амдерма и о-в Голомянный) увеличиваются, а максимальные — уменьшаются. Сравнительный анализ оценок для отдельных полярных станций показал, что при перемещении с запада на восток, а также с севера на юг региона отмечается уменьшение как медианных, так и экстремальных значений скорости ветра.

Поскольку для ветряных энергетических систем важна информация не только о типичных скоростях

ветра и их изменениях, но и о повторяемости периодов со скоростью ветра ниже минимальной рабочей для ветрогенераторов, был проведен анализ повторяемости безветренных периодов, со скоростью ветра менее 1,5 м/с (таблица, рис. 3).

Повторяемость (в %) скоростей ветра менее 1,5 м/с на полярных станциях в Российской Арктике

Станция	Повторяемость, %
Шойна	9,1
Амдерма	4,6
Диксон	3,9
о-в Голомянный	5,4
Хатанга	8,0
Тикси	19,7
Чокурдах	9,1
о-в Айон	9,5

Повторяемость скоростей ветра менее 1,5 м/с в среднем составляет 8,6% и изменяется от 3,9% на ст. Диксон до 19,7% на ст. Тикси. Согласно рис. 3 продолжительность безветренных периодов в регионе не превышает 3 ч (1 срок) при $p = 95\%$, 9 ч при $p = 99\%$ и 30 ч при $p = 99,9\%$. Статистика уменьшения

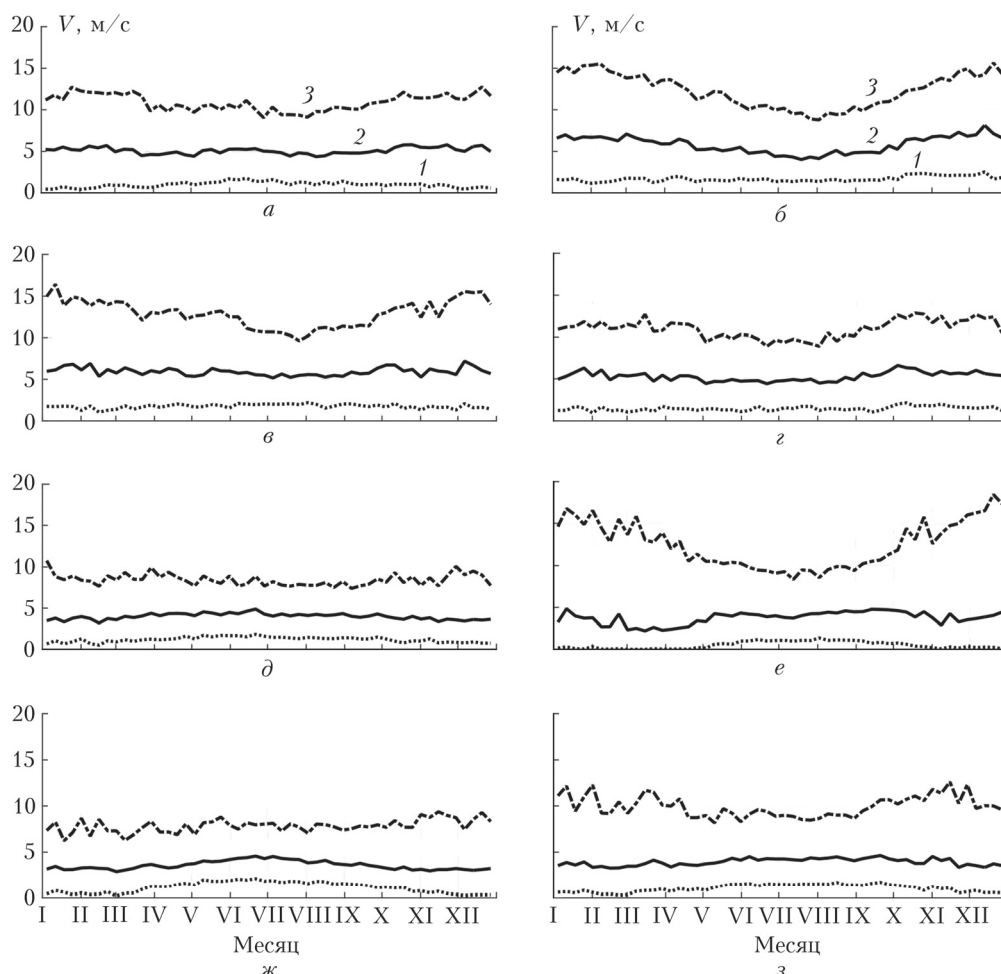


Рис. 2. Внутригодовое изменение медианных (2), а также минимальных (1) и максимальных (3) при $p = 95\%$ значений скорости ветра на высоте 10 м по данным за 1987–2016 гг. на полярных гидрометеорологических станциях: Шойна (а), Амдерма (б), Диксон (в), о-в Голомянный (г), Хатанга (д), Тикси (е), Чокурдах (ж), о-в Айон (з)

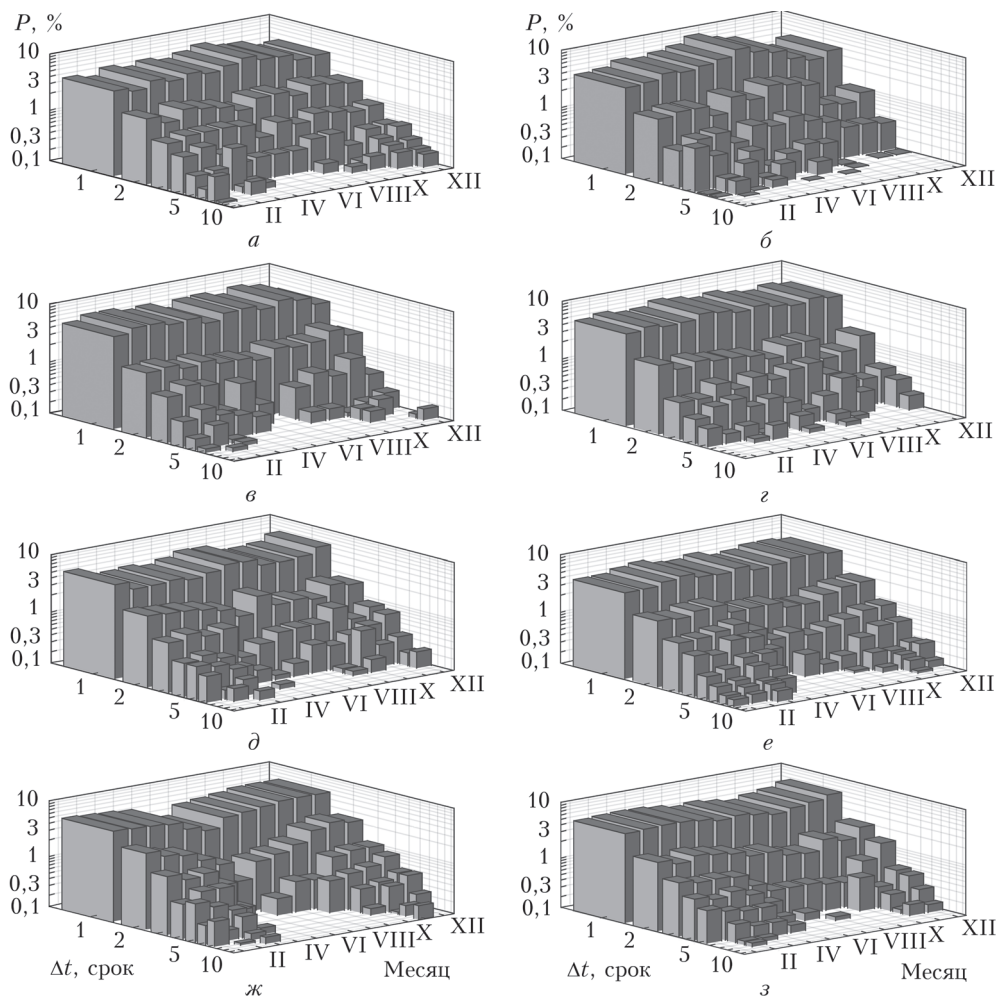


Рис. 3. Повторяемость P периодов со скоростью ветра менее $1,5 \text{ м/с}$ различной продолжительности Δt (в метеорологических сроках) в различные месяцы по данным о скорости ветра на высоте 10 м за $1987\text{--}2016 \text{ гг.}$ на полярных гидрометеорологических станциях: *a* – Шойна; *б* – Амдерма; *в* – Диксон; *г* – о-в Голомянный; *д* – Хатанга; *е* – Тикси; *ж* – Чокурдах; *з* – о-в Айон

повторяемости безветренных периодов при увеличении их продолжительности не соответствует нормальному закону и близка к степенному распределению. Для степенного закона вероятность редких событий значительно превосходит аналогичную вероятность при нормальном законе. Максимальная продолжительность безветренных периодов на большинстве станций отмечается зимой, а минимальная – летом. Исключение – станция о-ва Голомянный, где наблюдается обратная зависимость.

2.2 Ресурсы солнечной энергии

Поток суммарной солнечной энергии с марта по сентябрь составляет не менее $1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ и достигает пиковых значений в июне; его максимально возможные (при $p = 95\%$) значения – $7\text{--}8 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ (рис. 4, штрихпунктирные кривые), а медианные – $5\text{--}7 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ (рис. 4, сплошные кривые). Пик минимально возможных (при $p = 95\%$) значений потока солнечной энергии ниже на $\sim 1 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ и $\sim 2 \text{ кВт} \cdot \text{ч}/\text{м}^2$ пиков медианных и максимально возможных значений соответственно (рис. 4, пунктирные кривые); на большинстве станций он смещен на относительно последних на более ранний период времени (май – нача-

ло июня), что, по-видимому, связано с повышенной повторяемостью облачности в летние месяцы. Исключением является полярная станция о-ва Голомянный, на которой пики минимальных, медианных и максимальных значений совпадают.

При перемещении с запада на восток отмечается общее увеличение потока суммарной солнечной радиации в летние месяцы (рис. 4), что, вероятно, связано с уменьшением повторяемости облачности. Такая долготная зависимость наиболее ярко проявляется в минимальной величине потока суммарной солнечной радиации. Подобная зависимость должна проявляться и при перемещении с севера на юг. Однако пиковые значения минимального потока суммарной солнечной энергии на ст. о-ва Голомянный превышают аналогичные значения на ст. Хатанга, хотя последняя на $\sim 8^\circ$ южнее. Отмеченную особенность предположительно можно объяснить большей повторяемостью облачности, особенно нижнего яруса, в континентальной части Арктики.

Сравнение полученных результатов с оценками ресурсов солнечной энергии в Арктическом регионе [4] позволило сделать следующие выводы: 1) только средние оценки, полученные нами в летние месяцы, близки к оценкам, приведенным в [4], которые полу-

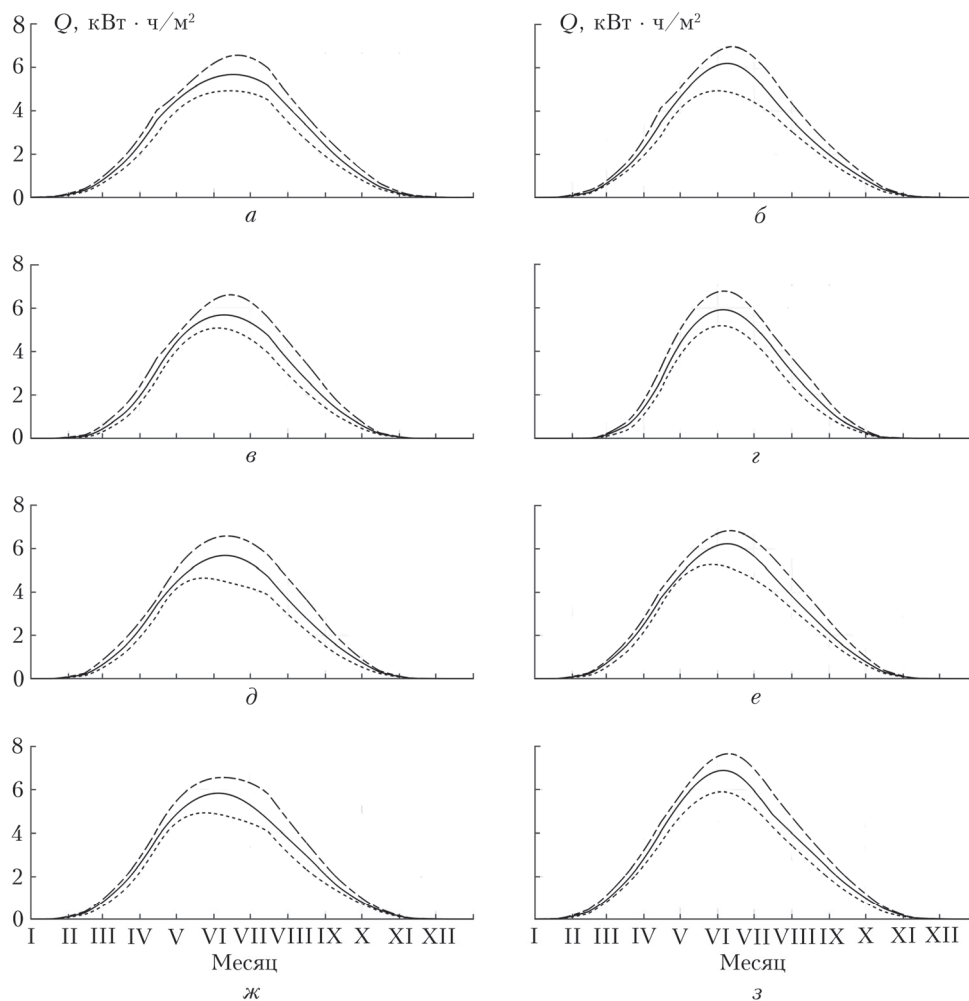


Рис. 4. Внутригодовое изменение минимальных (пунктирные кривые), медианных (сплошные) и максимальных (штрихпунктирные) при $p = 95\%$ значений потока суммарной солнечной радиации в узлах, соответствующих положению полярных гидрометеорологических станций: *a* – Шойна; *б* – Амдерма; *в* – Диксон; *г* – о-в Голомянный; *д* – Хатанга; *е* – Тикси; *ж* – Чокурдах; *з* – о-в Айон (по данным реанализа за 1987–2016 гг.)

чены на основе данных на верхней границе атмосферы и, следовательно, не учитывают влияние облачности; 2) в [4] нет детального анализа суточно-сезонных вариаций, а само исследование проведено для более коротких временных рядов; 3) авторы [4] отмечают необходимость определения оценок максимальных и минимальных потоков в суточно-сезонном цикле.

2.3. Оценка влияния климатических изменений на изменчивость ресурсов солнечной и ветровой энергии

Приведенные выше закономерности получены за 30-летний климатический интервал, что позволяет достоверно судить об особенностях суточно-сезонных вариаций скорости ветра и потока солнечной радиации на территории Российской Арктики. Поскольку Арктика – объект, индикатор и важный фактор изменения глобального климата [12] и при этом один из наиболее чувствительных к подобным изменениям регионов [13], рассмотрим, какие процессы, связанные с климатическими изменениями, могут привести к эволюции полученных закономерностей исследуемых величин.

Океан и морской лед в центре Арктики влияют на формирование ее климата и определяют воздействие на глобальный климат. Поэтому изменениям климата над арктическими морями всегда уделяется особое внимание [14]. Изменения температуры воздуха над морской частью Арктики характеризуются быстрым ростом с конца 1990-х гг.: среднегодовые тренды температуры в Арктике в последние десятилетия в 2 раза превышают среднеглобальные оценки [15]. Параллельно наблюдается интенсивное уменьшение площади, концентрации и толщины арктических льдов [5], а также таяние многолетней мерзлоты на континенте [16].

Причиной ускоренного потепления в этом регионе может быть изменение адвекции тепла и влаги с поверхности океанов вследствие колебаний крупномасштабной атмосферной циркуляции и температуры поверхности океана [17–18]. Свой вклад может внести изменение радиационного баланса из-за увеличивающегося антропогенного воздействия [19].

В ходе недавних исследований были получены количественные оценки переноса тепла в Арктику, которые показали [20], что основной приток явного

и скрытого тепла в высокие широты в зимний период происходит через атлантическую часть ее южной границы по 70° с.ш. (от 0 до 80° в.д.) в слое от поверхности до 750 гПа. Именно на границе 70° с.ш. наблюдается наиболее сильная линейная связь между климатом Арктики, представленным приземной температурой воздуха, и меридиональным потоком энергии [21]. Кроме того, граница 70° с.ш. в значительной степени совпадает с границей области влияния кольцевой стационарной моды высокоширотной климатической изменчивости — Арктического колебания [22].

Вклад притока энергии в межгодовую изменчивость средней зимней температуры воздуха на поверхности составляет более 50%, и эта величина возрастает. Летом основной вклад в изменение климата вносят радиационные притоки тепла к поверхности, в частности, нисходящая длинноволновая радиация, а перенос тепла и влаги через 70° с.ш. не влияет на температуру воздуха и содержание водяного пара в нижней тропосфере, поскольку преобладает вынос водяного пара из Арктики [18].

Несмотря на то, что в последние годы в ряде работ отмечаются изменения климатических характеристик и режима циркуляции в Арктике, согласно перспективным оценкам будущего климата, изменение годового прихода солнечной радиации в XXI в. будет в пределах ± 2 –4% от современного уровня [5]. Эти изменения связаны в основном с изменениями облачного покрова. В ближайшие десятилетия также не следует ожидать существенных изменений приземной скорости ветра и, следовательно, ветроэнергетических ресурсов на большей части территории России, включая арктические районы. Поэтому можно предположить, что климатические изменения не окажут существенного негативного влияния на выработку энергии на основе анализируемых возобновляемых источников.

Заключение

Оценки сезонно-суточных величин суммарной радиации и скорости ветра в Российской Арктике на 30-летнем интервале позволили сделать следующие выводы.

Поток суммарной солнечной энергии с марта по сентябрь составляет не менее 1 кВт · ч/м² и достигает пиковых значений в июне. Максимально возможные значения потока составляют 7–8 кВт · ч/м², а медианные значения — 5–7 кВт · ч/м². При перемещении с запада на восток минимально возможные значения потока суммарной солнечной энергии увеличиваются в летние месяцы.

Медианные значения скорости ветра в регионе составляют 4–6 м/с и незначительно изменяются в течение года. Минимальные значения скорости ветра от зимы к лету увеличиваются, а максимальные — уменьшаются. При перемещении с запада на восток, а также с севера на юг отмечается уменьшение как медианных, так и экстремальных значений скорости ветра.

Повторяемость скоростей ветра менее 1,5 м/с в среднем составляет ~9% и изменяется в различных частях Арктического региона от 4 до 20%, а распре-

деление длительности интервалов со скоростью ветра менее 1,5 м/с уменьшается с увеличением интервала по степенному закону.

В результате максимум поступления солнечной энергии приходится на летнее время, максимум скоростей ветра приходится на холодное время года, а максимум потребности в энергии имеет место зимой. Таким образом, совместное использование солнечной энергии и ветроэнергетического потенциала в Российской Арктике создает все предпосылки для использования там возобновляемых источников энергии.

Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках ФЦП ИР (соглашение № 14.607.21.0205 уникальный идентификатор ПНИ RFMEFI60718X0205).

1. Бердин В.Х., Кокорин А.О., Юлкин Г.М., Юлкин М.А. Возобновляемые источники энергии в изолированных населенных пунктах Российской Арктики. М.: Всемирный фонд дикой природы, 2017. 80 с.
2. Смоленцев Д.О. Развитие энергетики Арктики: проблемы и возможности малой генерации // Арктика: экология и экономика. 2012. № 3 (7). С. 22–29.
3. Соловьев Д.А. Малая энергетика в Арктике: проблемы адаптации и риски // Энергия: экономика, техника, экология. 2017. № 11. С. 14–21.
4. Попель О.С., Киселева С.В., Моргунова М.О. Использование возобновляемых источников энергии для энергоснабжения потребителей в Арктической зоне Российской Федерации // Арктика: экология и экономика. 2015. № 1 (17). С. 64–69.
5. Второй оценочный доклад Росгидромета об изменениях климата и их последствиях на территории Российской Федерации. М.: НИЦ Планета, 2014. 58 с.
6. Радонов В.Ф., Русина Е.Н., Сибир Е.Е. Специфика многолетней изменчивости суммарной солнечной радиации и характеристик прозрачности // Проблемы Арктики и Антарктики. 2007. № 76. С. 131–136.
7. Суркова Г.В., Крылов А.А. Изменения средних и экстремальных скоростей ветра в Арктике в конце XXI века // Арктика и Антарктика. 2018. № 3. С. 26–36.
8. Карамов Д.Н. Математическое моделирование солнечной радиации с использованием многолетних метеорологических рядов, находящихся в открытом доступе // Изв. Томского политех. ун-та. Инжиниринг георесурсов. 2017. Т. 328, № 6. С. 28–37.
9. Шерстюков Б.Г. Климатические условия Арктики и новые подходы к прогнозу изменения климата // Арктика и Север. 2016. № 24. С. 39–67.
10. Минин В.А. Ресурсы нетрадиционных и возобновляемых источников энергии Мурманской области и приоритеты их использования // Вестн. Кольского науч. центра РАН. 2010. № 1. С. 94–101.
11. Автоматизированная Информационная Система Обработки Режимной Информации (АИСОРИ) [Электронный ресурс] // Всерос. науч.-исслед. Ин-т гидрометеорол. информ. (ВНИИГМ-МЦД) URL: <http://aisori.meteo.ru/ClimateR> (дата обращения: 14.03.2019).
12. Катцов В.М., Порфирьев Б.Н. Климатические изменения в Арктике: последствия для окружающей среды и экономики // Арктика: экология и экономика. 2012. № 2 (6). С. 66–79.
13. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* / S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, H.L. Miller (eds.). Cambridge: Cambridge University Press, 2007. 996 p.

14. *Макоско А.А.* Гидрометеорологическое обеспечение плавания по трассам Северного морского пути // Арктика: экология и экономика. 2013. № 3 (11). С. 40–49.
15. *Доклад* об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2014 год. М.: Росгидромет, 2015. 107 с.
16. *Кокорин А.О., Карелин Д.В., Стеценко А.В.* Воздействие изменения климата на Российскую Арктику: анализ и пути решения проблемы. М.: Всемирный фонд дикой природы, 2008. 28 с.
17. *Семенов В.А., Мохов И.И., Полонский А.Б.* Моделирование влияния естественной долгопериодной изменчивости в Северной Атлантике на формирование аномалий климата // Морской гидрофиз. журн. 2014. № 4. С. 14–27.
18. *Алексеев Г.В., Радионов В.Ф., Смоляницкий В.М., Фильчук К.В.* Результаты и перспективы исследований климата и климатического обслуживания в Арктике // Проблемы Арктики и Антарктики. 2018. Т. 64, № 3. С. 262–267.
19. *Philipona R., Behrens K., Ruckstuhl C.* How declining aerosols and rising greenhouse gases forced rapid warming in Europe since the 1980s // *Geophys. Res. Lett.* 2009. V. 36. P. L02806.
20. *Алексеев Г.В., Кузьмина С.И., Уразгильдеева А.В., Бобылев Л.П.* Влияние атмосферных переносов тепла и влаги на усиление потепления в Арктике в зимний период // *Фундам. и прикл. климатол.* 2016. Т. 1. С. 43–63.
21. *Van der Swaluf E., Drijfhout S., Hazeleger W.* Bjerkenes compensation at high northern latitudes: The Ocean Forcing the Atmosphere // *J. Climate.* 2007. V. 20. P. 6023–6032.
22. *Thompson D.W.J., Wallace J.M.* The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields // *Geophys. Res. Lett.* 1998. V. 25. P. 1297–1300.

K.N. Pustovalov, E.V. Kharyutkina, V.A. Korolkov, P.M. Nagorskiy. **Variability in resources of solar and wind energy in the Russian sector of Arctic.**

Based on observational data of meteorological stations and reanalysis data, seasonal-daily values of total radiation and wind speed in the Russian sector of the Arctic were estimated over the time interval 1987–2016. Possible climate change effect was also considered. It was revealed that the total solar energy flux reached the peak values in June (7–8 kW h/m²); moreover, its increase was noted in summer months, when moving from west to east. The median values of wind speed in the region were 4–6 m/s and they were not significantly changed during a year. Minimal values of wind speed increased from winter to summer, and the maximal ones decreased. When moving from west to east, as well as from north to south a decrease in median and extreme wind speed values was observed. It was established that the frequency of wind speed less than 1.5 m/s, on average in the region, was 9%, and it varied from 4 to 20%, and the duration of windless periods did not exceed 3 hours ($p = 95\%$). The probability of appearance of intervals with wind speed less than 1.5 m/s decreased with an increase in the length of these time intervals according to the exponential distribution law. Thus, a joint usage of solar and wind energy potential in the northern regions of Russia gives rise to all prerequisites in accelerated development of renewable energy sources in the Russian Arctic.