

Использование возобновляемых источников энергии для энергоснабжения потребителей в Арктической зоне

Попель О.С.¹, Киселева С.В.², Моргунова М.О.¹, Габдрахманова Т.С.¹, Тарасенко А.Б.¹

1-Объединенный институт высоких температур РАН

*2-Научно-исследовательская лаборатория возобновляемых источников энергии
Московского государственного университета им. М.В.Ломоносова*

Введение. Освоение Арктической зоны, сформулированное как одно из ключевых направлений развития российской экономики в XXI веке, является сложной комплексной задачей, требующей разработки ряда технических решений, в том числе в области эффективного энергоснабжения действующих и планируемых к созданию промышленных и инфраструктурных объектов, а также развивающихся местных поселений. С одной стороны, существует проблема доставки в регион и внутри него необходимых ресурсов, включая горюче-смазочные материалы и запасные части, которая осложняется суровым климатом и слабо развитой транспортной инфраструктурой. С другой – арктический регион является источником не только полезных ископаемых, но пищевых и рекреационных ресурсов, зоной проживания коренных народностей Севера. К нему приковано внимание средств массовой информации и экологических организаций, что заставляет уделять пристальное внимание экологическим аспектам реализуемых и планируемых в регионе проектов. Не претендуя на полное решение энергетических проблем региона, возобновляемые источники энергии (ВИЭ) могут быть эффективным средством решения ряда локальных энергетических задач при условии корректного учета потенциала этих ресурсов, технико-экономического анализа конкурирующих решений и правильного выбора ключевых компонентов энергоустановок, работоспособных в суровых условиях Арктики.

Арктический регион располагает широким спектром ВИЭ. Среди них ключевыми являются энергия ветра (районы вдоль северных морских границ России характеризуются средними скоростями ветра более 6-7 м/с, что крайне привлекательно для применения ветроэнергетических установок), солнечная энергия, в отдельных районах – энергия растительной биомассы, энергия морских волн и приливов. Ведутся поисковые исследования по энергетическому использованию разности температур морской воды и атмосферного воздуха, разности соленостей морской и речной воды. В некоторых районах имеются разведанные запасы геотермального тепла. В одной статье не представляется возможным рассмотреть весь широкий спектр перспективных технологий использования местных ВИЭ. В этой связи в данной работе основное внимание уделяется некоторым результатам, полученным авторами в рамках Программы поисковых фундаментальных научных исследований Российской академии наук в интересах развития Арктической зоны Российской Федерации в части анализа возможностей практического применения солнечной энергии.

1. Характеристика территории и потенциальных потребителей. Территория Арктической зоны РФ (АЗРФ) составляет 4386,6 тыс. кв. км или 25,7% от общей площади территории Российской Федерации. Численность населения – более 2,5 млн. человек, что составляет менее 2% населения страны и около 40% населения всей Арктики [1]. Арктическая зона РФ имеет низкую плотность населения и высокую дисперсность расселения. Арктика крайне неоднородна также по уровню интенсивности хозяйственной деятельности и по инфраструктурной освоенности. Большую часть территории Арктической зоны РФ составляют районы с плотностью населения менее 1 человека на 1 кв. км и экстремально низким уровнем экономической активности.

Однако Арктическая зона РФ отличается самой высокой урбанизированностью: более 80% населения проживает здесь в городах и поселках с населением свыше пяти тысяч человек [2]. Здесь расположен ряд промышленных центров с населением свыше 100 тыс. человек (Архангельск, Мурманск, Воркута, Норильск).

Большой интерес к региону в настоящее время связан с возможностью добычи там полезных ископаемых, прежде всего – газа и нефти. Таким образом, одним из приоритетных энергопотребителей являются системы, связанные с разведкой, освоением месторождений и добычей природных ресурсов. Речь идет о буровых установках, в том числе морского базирования, насосах, обеспечивающих извлечение нефти, вахтовых поселках персонала. В ряде регионов – Мурманской области, Республике Саха, Эвенкии – развивается добыча руд, созданы или строятся горно-обогатительные комбинаты. В Архангельской области одним из наиболее развитых секторов является лесная промышленность, которая, правда, в последнее время страдает от истощения ресурсно-сырьевой базы. Истощение связано с отсутствием адекватного лесовосстановления в периоды освоения тайги в регионе, что привело к увеличению плеча доставки сырья к комбинатам и портам до величин, ведущих к потере рентабельности производства. Вместе с тем старые вырубки зарастают так называемыми пионерными породами деревьев (береза, осина, ольха), не имеющими большой ценности как сырье собственно для лесного сектора, но которые возможно использовать в качестве сырья пеллетного производства [3]. Это позволит частично закрыть потребности региона в сырье для получения тепловой энергии, проблема получения которой является в данном случае такой же актуальной, как и получение электроэнергии, и сохранить рабочие места для жителей отдаленных поселков области. Рыбная отрасль также является достаточно важным сегментом экономики региона. Здесь в качестве основных потребителей энергии могут рассматриваться верфи и порты, обслуживающие рыболовецкий флот, предприятия по первичной переработке рыбы и поселки персонала. Оленеводство является одним из основных промыслов многих кочевых народов Севера. Этот промысел предполагает длительное пребывание семей в тундре при отсутствии централизованной сети. Вместе с тем в такие периоды эти люди должны быть обеспечены связью и освещением. В настоящее время для этих целей используются мобильные бензоагрегаты, выбросами отработанных газов и разливами топлива наносящие тяжелый ущерб хрупкой природе северной тундры. Важно отметить, что выпас оленей обычно происходит в течение полярного дня, что открывает возможности для широкого использования солнечной энергии для этих целей. Известны пилотные проекты в этой области, предпринятые в Нижнеколымском улусе Республики Саха [4].

Обеспечение безопасности движения всех видов транспорта особенно важно в данном регионе, с учетом наличия международных торговых коммуникаций (Северный морской путь) и большой зависимости населенных пунктов от доставляемых водными, наземными или воздушными путями грузов. Для навигационных целей широко используются автономные светосигнальные устройства: буи, маяки, аэродромные огни. Для отдельных населенных пунктов, не имеющих промышленных предприятий, график электрической нагрузки во многом определяется насосами системы отопления поселка – котельных установок, работающих на дровах, мазуте или угле. Это определяет существенную сезонную неравномерность энергопотребления таких поселков. Отклонение реального энергопотребления от графиков нагрузки режимного дня составляет от 11 до 56%, причем максимум отклонения приходится на летние месяцы. Связано это с тем, что зимой стабильно низкие температуры воздуха, а в весенне-летний и осенний периоды средняя температура от месяца к месяцу претерпевает существенные изменения, что влечет за собой и сдвиг графика нагрузки. В результате отклонение реальных нагрузок от используемых в расчетах энергетических балансов показателей по летнему режимному дню может составлять 40-50%.

2. Предпосылки использования и оценка ресурсов солнечной энергии в Арктическом регионе

Как следует из проведенного выше краткого анализа, в Арктической зоне имеются разнообразные потенциальные ниши для практического использования солнечной энергии. С учетом высокоширотного расположения потребителей, безусловно, речь может вестись только о сезонном наземном использовании солнечной энергии в периоды солнечного сияния.

Бытует устойчивое мнение, что на Севере использование солнечной энергии не перспективно в связи с ее малыми ресурсами. Однако такое утверждение не вполне правомерно. Известно, что суммарная продолжительность световых периодов в течение года для любой точки земного шара одинакова и равна суммарной продолжительности ночей. В высоких широтах максимум продолжительности солнечного сияния приходится на лето (за полярным кругом – на полярный день), в то время как в экваториальной зоне продолжительности дней и ночей в течение всего года примерно одинаковы. Таким образом, за пределами атмосферы интегральный годовой поток солнечного излучения, направленный на подвижную, ориентированную на Солнце единичную площадку, в любой точке земного шара одинаков. И поступление энергии солнечного излучения на такую площадку, расположенную на поверхности земли, определяется в первую очередь не широтой местности, а прозрачностью слоя атмосферы, через который проникают солнечные лучи. Для районов земного шара расположенных в высоких широтах толщина проходимого солнечным излучением атмосферного слоя выше, чем в низких широтах в связи с более низким солнцестоянием над горизонтом. Кроме того, поступление энергии солнечного излучения к поверхности Земли определяется влагосодержанием атмосферы, наличием облачности и рядом других характеристик воздушной среды. Отметим, что например в центральных районах Антарктиды, расположенных в окрестностях южного полюса (ст. «Восток») на высоте над уровнем моря около 4 км и характеризующихся постоянно господствующими антициклонами с низкой отрицательной температурой воздуха, обуславливающей вымораживание влаги, в летние дни регистрируются потоки солнечного излучения на площадку, ориентированную на Солнце на уровне 1,1-1,2 кВт/м², что близко к предельному заатмосферному значению $\approx 1,4$ кВт/м². Интересно также указать, что там же потоки солнечного излучения на вертикальные поверхности северной ориентации с учетом отраженного от снежного покрова излучения иногда достигают 1,6-1,7 кВт/м² и оказываются больше солнечной постоянной.

Для целей проектирования и прогноза эффективности работы солнечных установок, необходимы надежные данные о падающей солнечной радиации с максимальным охватом территории и частотой сетки. В настоящее время доступными являются лишь ограниченные результаты наземных актинометрических измерений в этом регионе в виде осредненных данных, опубликованные, например, в [5]. В издании приведены данные по солнечной радиации, полученные на актинометрических станциях, большинство из которых расположено в основном на побережье морей и островах Северного Ледовитого океана.

Накопленный опыт успешного использования базы данных NASA SSE [6] при оценке ресурсов солнечной энергии на территории РФ [7, 8], а также при решении задач проектирования солнечных энергетических установок дает основание для использования данных NASA и для оценки ресурсов солнечной энергии в Арктическом регионе. На рис. 1 в качестве примера приведена карта распределения среднесуточных сумм (кВтч/м²/день) прямой солнечной радиации, поступающей на следящую за Солнцем поверхность в течение года, построенная по данным NASA. Видно, что в Арктической зоне среднегодовое дневное поступление энергии прямого солнечного излучения варьируется от 2 до 5 кВтч/м²/день или от 0,7 до 1,8 МВтч/м²/год (от 60 до

150 кг у.т./м²/год). Этот энергетический потенциал солнечной энергии является существенным и пригодным для практического использования. Для сравнения отметим, что среднедневное поступление солнечной энергии в южных районах Германии, где солнечные установки находят широкое применение, составляет всего около 3,4 кВтч/м²/день. В ясные летние дни во многих районах Арктики текущее поступление солнечной энергии на неподвижные ориентированные на юг приемные поверхности с оптимальным углом наклона к горизонту могут достигать 6-8 кВтч/м², что соизмеримо с поступлениями энергии солнечного излучения в южных районах страны.

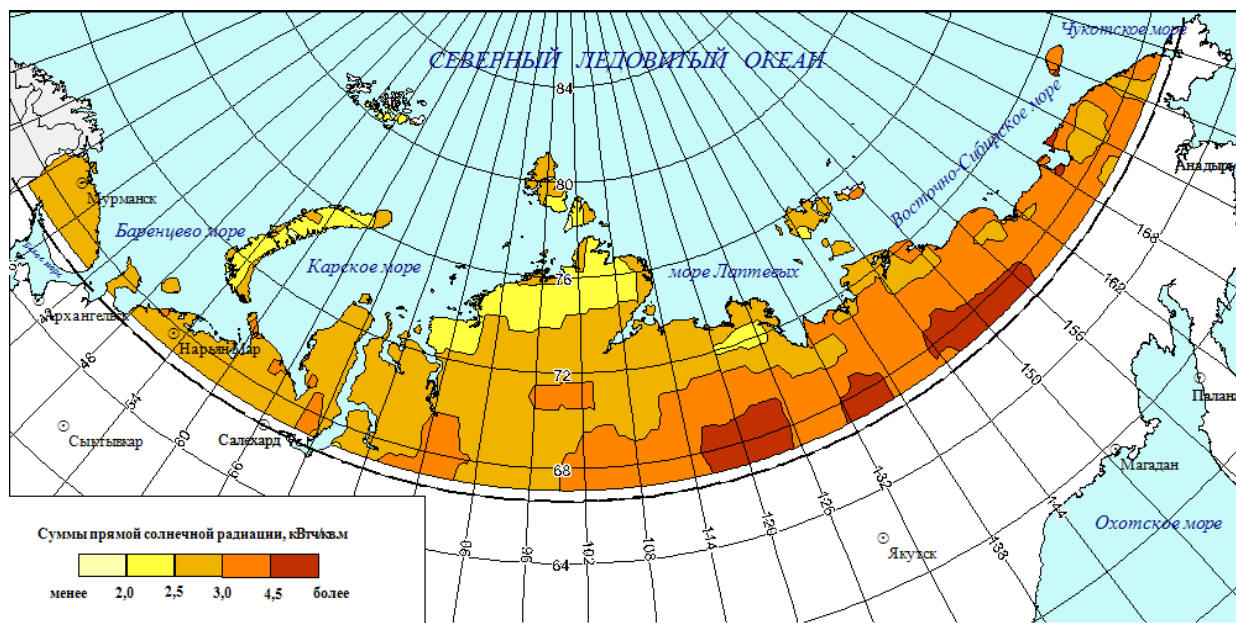


Рисунок 1 – Распределение среднесуточных сумм (кВтч/м²/день) прямой солнечной радиации, поступающей на следующую за Солнцем поверхность. Арктическая зона РФ. Карта построена по данным NASA н.с. НИЛ ВИЭ географического факультета МГУ Ю.Ю. Рафиковой

Важным является вопрос об адекватности базы данных NASA реальной ситуации. С целью ответа на этот принципиальный вопрос была проведена оценка погрешности данных NASA SSE в арктической зоне РФ на основе сравнения (верификации) с результатами наземных метеорологических измерений [5]. Сравнение проводилось по следующим характеристикам:

- среднегодовые суммы суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность при средних условиях облачности;
- среднегодовые суммы прямой солнечной радиации на нормальную к лучу поверхность при средних условиях облачности.

При верификации были определены средние, максимальные и минимальные отклонения суммарной солнечной радиации для точек, максимально близких по географическому положению. Было установлено, что максимальное отклонение среднегодовых значений сумм суммарной солнечной радиации на горизонтальную поверхность имеет место для метеообсерватории имени Кренкеля» (80,44 с.ш., 58.01 в.д.), минимальное отклонение – для станции на острове Преображения (74,66 с.ш., 112,97 в.д.). Среднее значение отклонения данных NASA от результатов наземных измерения составляет 0,47 кВтч/м²/сутки. Среднее значение отклонения для по прямой солнечной радиации на нормальную поверхность равно 1,47 кВтч/м²/сутки; минимальное среднее отклонение – 0,75 кВтч/м²/сутки (метеообсерватория имени

Кренкеля), максимальное среднее отклонение – 2,42 кВтч/м²/сутки (метеообсерватория на о-ве Визе).

Максимальное отклонение актинометрических данных о прямой радиации приходится на летние месяцы – июнь, июль, август. Для зимних месяцев NASA SSE дает, как правило, заниженные данные, а для летних – завышенные. Для суммарной радиации: максимальное отклонение наблюдается также в летние месяцы, преимущественно в августе; для зимних месяцев NASA предоставляет несколько заниженные данные, для летних – завышенные; в целом отклонение значений NASA и наземных метеообсерваторий по суммарной солнечной радиации существенно меньше, чем по прямой радиации.

Зависимости величины погрешности от широты месторасположения метеостанции не обнаружено: для прямой солнечной радиации станции с максимальной и минимальной погрешностью находятся на соседних широтах – 79 ° и 80 °с.ш. соответственно. По суммарной солнечной радиации станция с максимальным отклонением – на широте 80, с минимальным – на широте 74°.

Таким образом, верификация различных источников данных (NASA SSE и наземные измерения) показала, что если средние и минимальные отклонения среднемесячных значений суммарной радиации сопоставимы с таковыми в более южных широтах РФ [7] то максимальные отклонения – гораздо больше и могут достигать 50% величины. Это обуславливает необходимость при использовании данных NASA SSE проводить расчеты величины падающей солнечной радиации и иных производных энергетических показателей в терминах максимальных и минимальных оценок.

3. Портативная солнечная энергоустановка для арктических применений

Одним из наиболее эффективных и практически значимых применений солнечных установок в условиях Арктики могло бы стать обеспечение энергопотребностей некоторых групп потребителей, вынужденных длительное время находиться вне зоны действия локальных или централизованных электросетей (охотники, геологи, туристы, оленеводы и др.). В рамках выполнения исследований по упомянутой ранее Программе РАН нами разработан проект портативной энергоустановки на основе гибких фотоэлектрических модулей и накопителя электрической энергии, а также гарантированного источника питания (бензоагрегат, водородно-воздушный топливный элемент). Установка может применяться для питания осветительных устройств и средств связи.

Параметры установки:

- напряжение питания, В – 1,5–3,75; 7,4; 12; 24 (постоянный ток); 220 – (переменный ток, опция);
- мощность пиковая, Вт – до 240 (до 15 мин – перегрузка на уровне до 1 кВт);
- мощность длительная, Вт – 20.

Первичным источником энергии служит солнечная батарея из гибких монокристаллических фотоэлектрических модулей. В отличие от уже применяемых в Якутии модулей каркасной конструкции с защитными стеклами, гибкие модули существенно легче и безопаснее при транспортировке. Применен буферный накопитель на основе литий-ионных аккумуляторов. Возможны варианты исполнения с минимальной рабочей температурой 0 и -30°C, для чего используются разные виды аккумуляторов (см. раздел 4), что также существенно улучшает массогабаритные характеристики. Для продолжительных бессолнечных периодов предусматривается резервный источник питания на основе водородно-воздушного топливного элемента (в специальном исполнении) или бензоагрегата (для гражданских применений). Источник водорода в случае топливного элемента - картридж-генератор на основе гидролиза боргидрида натрия. Разогрев системы производится за счет теплового эффекта реакции; перед отключением топливного элемента катодный электрод должен быть продут

подогретым воздухом для частичного осушения во избежание замерзания. Внешний вид энергоустановки представлен на рис.2.

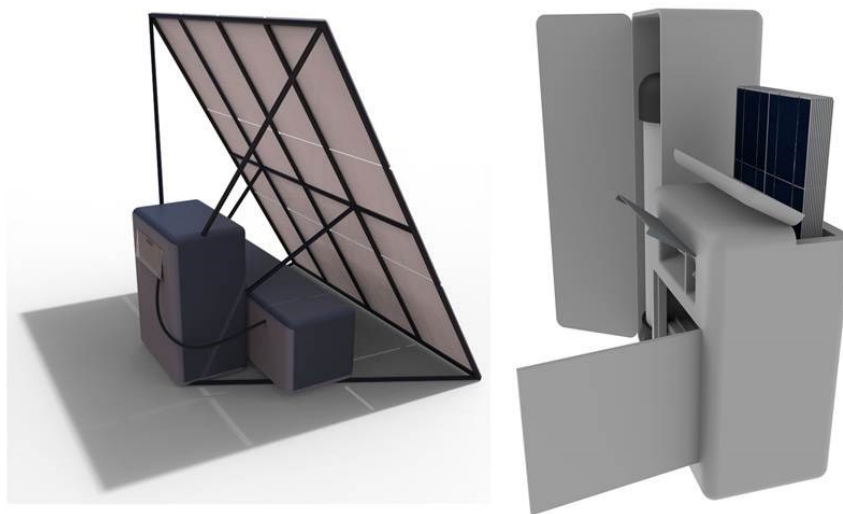


Рисунок 2. Внешний вид портативного источника питания (справа – транспортировочное положение, слева – рабочее при расположении модулей под углом 71° к горизонту)

Источник питания ориентирован на сезонное применение в светлое время года. Потенциальными потребителями для него являются средства связи, портативные телевизоры, рации, зарядные устройства переносных аккумуляторных батарей различного назначения. При комплектации устройства 6 гибкими фотоэлектрическими модулями пиковой мощностью 140 Вт каждый и аккумуляторной батареей на основе литий-наноитанатных аккумуляторов энергоемкостью 1,3 кВтч система работоспособна при температурах до -30°C . Средняя располагаемая мощность в условиях северной Якутии варьируется от 83 (февраль) до 154 Вт (апрель), что достаточно для питания средств связи и малой портативной электроники. Масса устройства составляет 64 кг, пиковая мощность (за счет разряда аккумуляторной батареи в течение часа) – 1,3 кВт. В январе, ноябре и декабре устройство неработоспособно из-за отсутствия солнечной радиации. При использовании топливного элемента в качестве гарантирующего источника электропитания при потребляемой мощности 20 Вт устройство может работать в течение 25 суток с повышением массы до 75 кг. Замена аккумуляторов на более энергоемкие обеспечивает следующие характеристики:

- минимальная рабочая температура – минус 10°C ;
- масса устройства с топливным элементом и источником водорода – 41 кг;
- масса устройства без топливного элемента и источника водорода – 32 кг;
- время автономной работы в бессолнечные периоды с использованием топливного элемента (потребляемая мощность 20 Вт) – 25 суток;
- располагаемая мощность – (124-155) Вт;
- пиковая мощность в течение 1 ч – 2 кВт.

При этом следует отметить, что в рассматриваемых условиях устройство с более энергоемкими аккумуляторами работоспособно с мая по сентябрь включительно (с учетом температурного режима аккумуляторной батареи).

3. Особенности использования накопителей энергии в арктических условиях

Создание солнечных и ветровых энергоустановок, с нестабильной выработкой энергии, сопряжено с необходимостью оснащения их накопителями энергии. Среди электрохимических накопителей энергии лидером по объемам производства и

инсталляции остаются свинцово-кислотные аккумуляторы, популярность которых обеспечивается освоением конструкции и технологией производства, а также относительной дешевизной [9]. Обычно используются заливные аккумуляторы, аккумуляторы панцирного типа (OpzV), аккумуляторы солнечных серий [10], гелевые аккумуляторы с плоскими пластинами, аккумуляторы с инкапсулированным в стекловолоконной матрице электролитом (AGM). Эти типы аккумуляторов существенно различаются ресурсом и стоимостью, причем наиболее дорогим и качественным решением являются аккумуляторы панцирного типа. Проблема ресурса, предельных токов и допустимой глубины разряда является ключевой для данного типа накопителей. Важным обстоятельством является также то, что для работы со свинцово-кислотными аккумуляторами (диапазоны рабочих напряжений, напряжений отсечки и повторного подключения, а также форма зарядной кривой) адаптировано большинство контроллеров заряда и инверторов, присутствующих на рынке.

Литий-ионные аккумуляторы привлекают внимание разработчиков в самых разных областях техники своими свойствами, существенно превосходящими – прежде всего по удельным и ресурсным показателям – аналогичные характеристики других электрохимических систем. К настоящему времени разработано и применяется большое количество разновидностей электродных материалов для литий-ионных аккумуляторов придающих им те или иные свойства [11]. Несомненными достоинствами литий-ионных аккумуляторов, определяющими перспективы их применения в стационарных энергоустановках на ВИЭ, являются не столько удельные характеристики, сколько высокая допустимая глубина разряда при сохранении приемлемых ресурсных характеристик. Среди всех разновидностей литий-ионных аккумуляторов наибольшее внимание привлекает система $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}||\text{NMC}$, где NMC – смесь литированных оксидов кобальта, марганца и никеля. В рамках анализа накопителей электрической энергии и материалов для них с учетом арктических условий проведены климатические испытания двух видов литий-ионных аккумуляторов. Экспериментально подтверждена перспективность использования литий-ионных аккумуляторов с нанотитанатным анодом для работы в энергоустановках при температурах окружающей среды до -30°C без затрат энергии на подогрев контейнера с накопителем электрической энергии. Режим охлаждения аккумулятора в циклах заряда-разряда предполагал, что в реальных условиях температура окружающей среды меняется относительно плавно, а не скачком. Было показано, что аккумулятор системы $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}||\text{NMC}$ сохраняет практически всю емкость в режиме плавного охлаждения и около двух третей – в режиме предварительного охлаждения. Вторая разновидность аккумуляторов ($\text{LiC}_6||\text{LiFePO}_4$) оказалась слабо работоспособной в обоих режимах из-за существенного снижения емкости относительно номинальной. Такой же результат получен и для свинцово-кислотных систем. При очевидной перспективности использования литий-ионных аккумуляторов с нанотитанатным анодом следует отметить необходимость дальнейшего снижения их стоимости, либо применения литий-железофосфатных аккумуляторов в теплоизолированных контейнерах.

Список цитированной литературы

- 1 Отчет о научно-исследовательской работе по теме «Разработка подпрограммы государственной программы Российской Федерации «Экономическое и социальное развитие Арктической зоны Российской Федерации на 2011-2020 годы» в Республике Саха (Якутия). [Электронный ресурс] /Официальный информационный портал Республики Саха (Якутия) [Офици. сайт]. URL: <http://www.sakha.gov.ru/en/node/65700> (дата обращения: 13.05.2012).
- 2 Пилясов А.Н. Контуры стратегии развития Арктической зоны России// Арктика: экология и экономика. 2011. № 1. 38-47.

- 3 Неиспользованный ресурс [Электронный ресурс]/Российские лесные вести. [Официальный сайт]. URL: <http://lesvesti.ru/news/news/5791/> (дата обращения 12.11.2014 г.).
- 4 Якутских оленеводов переводят на солнечные батареи [Электронный ресурс]/Российская Газета [Официальный сайт]. URL: <http://www.rg.ru/2009/03/12/reg-dvostok/sun-anons.html> (дата обращения 18.09.2014).
- 5 Научно-прикладной справочник по климату России (арктический регион). Солнечная радиация. СПб.: Гидрометеиздат. 1997, 238 с.
- 6 Surface meteorology and Solar Energy. A renewable energy resource web site (release 6.0) [Электронный ресурс]/ URL: <https://eosweb.larc.nasa.gov/cgi-bin/sse/grid.cgi?email=skip@larc.nasa.gov> (дата обращения 15.01.2015).
- 7 Попель О.С., Фрид С.Е., Коломиец Ю.Г., Киселева С.В., Терехова Е.Н.. Атлас ресурсов солнечной энергии на территории России. М.: Изд-во МФТИ. 2010. 83 с.
- 8 Климатические данные для возобновляемой энергетики России (База климатических данных): Учебное пособие / Попель О. С. и др. М.: Изд-во МФТИ. 2010, 56 с.
- 9 Тарасенко А.Б. Накопители электрической энергии для систем на основе ВИЭ: современное состояние и перспективы развития // Материалы восьмой всероссийской научной молодежной школы с международным участием. М.: Университетская книга. 2012. 148-185.
- 10 Шютц М. Презентация компании BAE Batterien GmbH в докладах Международной научно-практической конференции «Возобновляемая энергетика в изолированных системах Дальнего Востока России», 28 июня 2013 г., Якутск.
- 11 Scrosati B., Garche J.. Lithium batteries: Status, prospects and future, //Journal of Power Sources. 195 (2010), 2419–2430