



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
филиал ФГБОУ ВО «РГГМУ» в г. Туапсе

Кафедра «Метеорологии экологии и природопользования»

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)
по направлению подготовки 05.03.05 Прикладная гидрометеорология
(квалификация – бакалавр)

На тему «Анализ солнечной радиации степной зоны России и её энергетическая
эффективность в природопользовании»

Исполнитель: Канахин Руслан Владимирович

Руководитель: к.г.н., доцент Йошпа Александр Рувимович

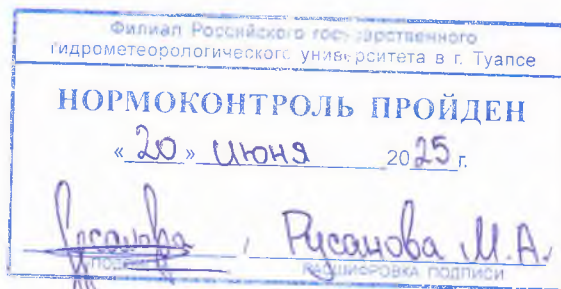
«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой

Цай

кандидат сельскохозяйственных наук, доцент
Цай Светлана Николаевна

«20» июня 2025 г.



Туапсе
2025

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1 Предпосылки для развития солнечной энергетики в исследуемых регионах....	5
1.1 Анализ метеорологических условий для размещения СЭС.....	5
1.2 Орографические предпосылки и их роль в эффективности СЭС.....	15
2 Орография и климатические ресурсы исследуемых регионов для солнечной энергетики.....	26
2.1 Климатические и орографические особенности Калмыкии для эксплуатации СЭС.....	26
2.2 Климатические и орографические особенности Крыма для эксплуатации СЭС.....	33
2.3. Климатические и орографические особенности Забайкальского края для эксплуатации СЭС.....	40
3 Влияние солнечной энергетики на народное хозяйство регионах.....	47
Заключение	57
Список литературы.....	59

Введение

Солнечная радиация — поток электромагнитного излучения от Солнца, достигающий Земли со средней интенсивностью $\sim 1361 \text{ Вт/м}^2$, формирующий климат, поддерживающий фотосинтез и водный цикл, а также служащий основой солнечной энергетики. В России её годовой приход варьирует от 800 до 1800 кВт·ч/м², обеспечивая потенциал для солнечных электростанций (СЭС). Прямая радиация, достигающая поверхности без рассеяния, составляет 65–80% и наиболее эффективна для СЭС, тогда как рассеянная, отражённая атмосферой, дополняет её, а суммарная радиация определяет общий энергопотенциал.

Развитие возобновляемой энергетики, включая солнечную, является приоритетным направлением для устойчивого развития России, особенно в регионах с высоким радиационным потенциалом. По данным Минэнерго РФ, доля возобновляемых источников энергии (ВИЭ) в энергобалансе страны к 2030 году должна достичь 4–6%, что требует эффективного использования метеорологических и орографических условий для размещения солнечных электростанций (СЭС). Калмыкия, Крым и Забайкальский край обладают уникальными климатическими характеристиками (инсоляция 1300–1550 кВт·ч/м², низкая облачность 15–25%) и рельефом (равнины, южные склоны), обеспечивающими рентабельность СЭС. Однако метеозависимость генерации, экстремальные явления (пыльные бури, грозы, снеговые заносы) и орографические ограничения создают вызовы, требующие анализа для оптимального размещения станций.

Актуальность исследования обусловлена необходимостью обоснования размещения СЭС с учётом метеорологических и орографических факторов для повышения энергетической безопасности, снижения зависимости от ископаемого топлива и укрепления народного хозяйства регионов. СЭС вносят вклад в энергобаланс (7–20% в исследуемых регионах), сокращают выбросы CO² (до 200 тыс. т/год) и поддерживают экономику, включая аграрный сектор

Калмыкии, туризм Крыма и удалённые поселения Забайкальского края. Изучение условий размещения СЭС позволяет минимизировать риски и повысить их эффективность, что особенно важно в условиях климатических изменений (годовой рост радиации на 50–242 МДж/м² или 14-67кВт·ч/м² за 1981–2013 гг.).

Объект исследования: Метеорологические и орографические условия степных зон Калмыкии, Крыма и Забайкальского края.

Предмет исследования: энергетическая эффективность солнечной радиации для размещения солнечных электростанций (СЭС) и их влияние на энергобаланс и экономику регионов.

Цель исследования: проанализировать метеорологические и орографические предпосылки размещения СЭС в Калмыкии, Крыму и Забайкальском крае для укрепления народного хозяйства.

Задачи исследования:

- ~ Охарактеризовать орографические условия регионов, влияющие на размещение СЭС.
- ~ Рассмотреть климатические условия, определяющие эффективность СЭС.
- ~ Оценить вклад СЭС в энергетический баланс и энергетическую безопасность регионов.
- ~ Проанализировать экономические и социальные эффекты от внедрения СЭС.
- ~ Разработать рекомендации по оптимальному размещению СЭС с учётом метеорологических и орографических факторов.

Значимость исследования: Разработка рекомендаций для размещения СЭС, повышающих энергетическую эффективность исследуемых регионов, а также для поддержки устойчивого развития, соответствующего целям государственной политики в области ВИЭ (возобновляемых источников энергии).

1 Предпосылки для развития солнечной энергетики в исследуемых регионах

1.1 Анализ метеорологических условий для размещения СЭС

Метеорологические условия степных зон Калмыкии, Крыма и Забайкальского края формируют прочные предпосылки для развития солнечной энергетики, определяя выбор площадок, технологий и эксплуатационных стратегий солнечных электростанций (СЭС). Анализ радиационного режима, облачности, атмосферной прозрачности, экстремальных погодных явлений, температурного и ветрового режимов позволяет выявить метеорологическую пригодность регионов и их микроклиматические особенности. Данные актинометрических наблюдений, долгосрочные климатические тренды и опыт действующих СЭС подчеркивают высокий потенциал исследуемых территорий, с акцентом на стабильную инсоляцию и минимальную облачность, несмотря на региональные риски, требующие специализированных адаптаций [5].

Радиационный режим является основным фактором, определяющим эффективность СЭС. В Калмыкии среднегодовая суммарная радиация составляет 1400–1500 кВт·ч/м² (5040–5400 МДж/м²), с пиком в июне–июле (6,5–7,0 кВт·ч/м²·день) и минимумом в декабре–январе (1,8–2,2 кВт·ч/м²·день) [25]. Прямая радиация (70–75%, 3500–3800 МДж/м²) преобладает благодаря низкой облачности, как в СЭС Малые Дербеты (5 МВт, выработка 7,5 млн.кВт·ч/год) [6, с.53]. Месячная изменчивость показывает, что 38% годового прихода приходится на лето, 34% на весну, 17% на осень и 10% на зиму, что требует стационарных панелей под постоянным наклоном в 30–35° или динамических трекинговых систем, повышающих выработку на 20–30%. Трекинговые системы – механизмы солнечных электростанций, автоматически регулирующие угол наклона фотоэлектрических панелей для отслеживания движения солнца, что повышает выработку электроэнергии как правило на 15–35% за счёт оптимального захвата радиации при суточном ходе. Суточная изменчивость радиации минимальна благодаря открытым горизонтам [12].

Распределение суммарной годовой солнечной радиации по территории Российской Федерации демонстрирует чёткий градиент с севера на юг, обусловленный широтным положением и облачностью. На севере РФ (например, Архангельская область, Чукотка) радиация составляет менее 800 кВт·ч/м² из-за низкого угла солнца и высокой облачности (50–70%). На юге, включая степные зоны Калмыкии, Крыма и Забайкальского края, радиация достигает 1300–1550 кВт·ч/м² благодаря антициклональным условиям и низкой облачности.

На рисунке 1.1 представлена схематическая карта суммарной годовой солнечной радиации на горизонтальную поверхность в РФ, иллюстрирующая изолинии от <800 кВт·ч/м² на севере до >1400 кВт·ч/м² на юге. Очевиден высокий солнечный потенциал южных степных зон.



Рисунок 1.1 - Схематическая карта распределения суммарной годовой солнечной радиации в РФ

Крым характеризуется радиацией 1350–1450 кВт·ч/м² (4861–5150 МДж/м²), с максимумом в июне–августе (6,0–6,5 кВт·ч/м²·день) и минимумом в декабре–январе (1,5–2,0 кВт·ч/м²·день) [22]. Прямая радиация (65–70%,

3200–3500 МДж/м²) снижена из-за морской влажности, но 250+ солнечных дней [22, с.99] обеспечивают стабильность, как в СЭС «Перово» (105,56 МВт, 130 млн.кВт·ч/год). Лето даёт 50% годового прихода, с пиком прямой радиации в июне (473–523 МДж/м²·месяц). Суточные пики (500–700 Вт/м²) поддерживают крышные СЭС в Евпатории, где наклон 30–35° оптимизирует выработку [21].

Забайкальский край имеет инсоляцию 1300–1400 кВт·ч/м² (4680–5040 МДж/м²), до 1500 кВт·ч/м² в юго-востоке (Борзя). Прямая радиация (75–80%, 2545–2969 МДж/м²) и сияние 260–2900 часов/год обеспечивают высокую выработку, как в СЭС Унда (150 кВт, 0,2 млн.кВт·ч/год). Пик радиации в мае–июле (6,5–7,2 кВт·ч/м²·день, 38% годового прихода) и минимум в декабре–феврале (1,2–1,6 кВт·ч/м²·день, 10%) требуют гибридных систем, как в Чарском районе (1 МВт). Положительный тренд прямой радиации (+116–242 МДж/м² за 1981–2013) и корреляция с сиянием ($R=0,69$) усиливают потенциал [11, с.80]. Коэффициент R (коэффициент корреляции Пирсона) — показатель силы и направления линейной связи между двумя переменными, варьирующий от -1 до 1 ; например, $R=0,69$ указывает на умеренно сильную положительную корреляцию. Это означает, что с увеличением сияния радиация возрастает, но связь не линейная ($0,69 < 1$). Трекинговые системы (с наклоном 35–40°) повышают КПД на 30–35%.

На рисунке 1.2 представлена сезонная изменчивость инсоляции в Калмыкии, Крыму и Забайкальском крае, демонстрирующая пики радиации в летний период (6,5–7,2 кВт·ч/м²·день) и минимумы зимой (1,2–2,2 кВт·ч/м²·день).

Облачность напрямую влияет на долю прямой радиации и стабильность выработки. В Калмыкии летняя облачность составляет 20–25%, зимняя — 30–40%, с общей облачностью 3–4 балла и нижней 1–2 балла [6, с. 63]. Пыльные бури (5–10 дней/год, март–апрель) снижают прозрачность на 10–15%, оседая на панелях [19, с.90], как в СЭС Малые Дербеты. Коэффициент корреляции между радиацией и облачностью ($R=-0,43$) указывает на умеренное

влияние [11, с. 81]. Юго-восток (Черноземельский район) предпочтителен из-за меньшей эрозии и запыленности.

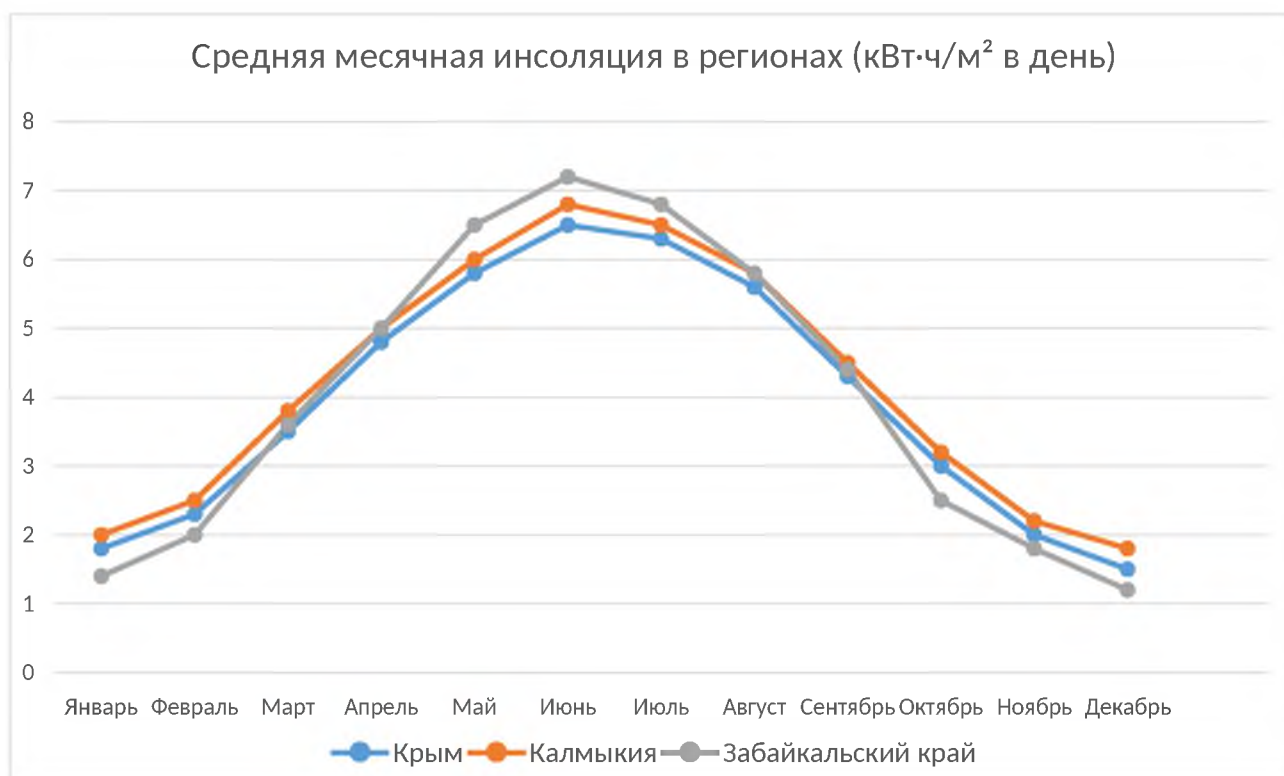


Рисунок 1.2 – Сезонная изменчивость инсоляции в регионах

Крым имеет летнюю облачность 25–30% (2–3 балла) и зимнюю 40–50% (4–5 баллов), с 250+ солнечными днями (2180–2470 часов) [22].

Морская влажность (50–60% в степи, 70–80% на ЮБК) увеличивает рассеянную радиацию (1758–2261 МДж/м²), снижая прямую на 5–10%, как в крышных СЭС Евпатории [11].

Восточные районы (Феодосия, облачность 20–25%) оптимальны благодаря антициклональным условиям. Корреляция радиации с облачностью ($R=-0,50$) подтверждает её влияние.

Забайкалье отличается облачностью 15–20% летом (1–2 балла) и 30–40% зимой (3–4 балла), с сиянием 260–2900 часов/год (Борзя: до 3150 часов). Низкая влажность (40–50%) и антициклоны обеспечивают прозрачность, повышая прямую радиацию (2545–2969 МДж/м²). Корреляция с сиянием ($R=0,69$) и облачностью ($R=-0,43$) подчёркивает их роль. Юго-восток (Мангут, Борзя) минимизирует облачное влияние, как в СЭС Унда.

В таблице 1.1 представлены данные об облачности и солнечном сиянии в Калмыкии, Крыму и Забайкальском крае

Таблица 1.1 – Облачность и солнечное сияние в регионах

Регион	Летняя облачность (%)	Зимняя облачность (%)	Солнечные дни (дней/год)	Солнечное сияние (часов/год)
Калмыкия	20-25	30-40	240+	2200-2500
Крым	25-30	40-50	250+	2180-2470
Забайкальский край	15-20	30-40	260-280	2000-3150

На рисунке 1.3 показан сезонный ход облачности в исследуемых регионах, подчёркивающий минимальные значения летом (15–25%) и рост зимой (30–50%)

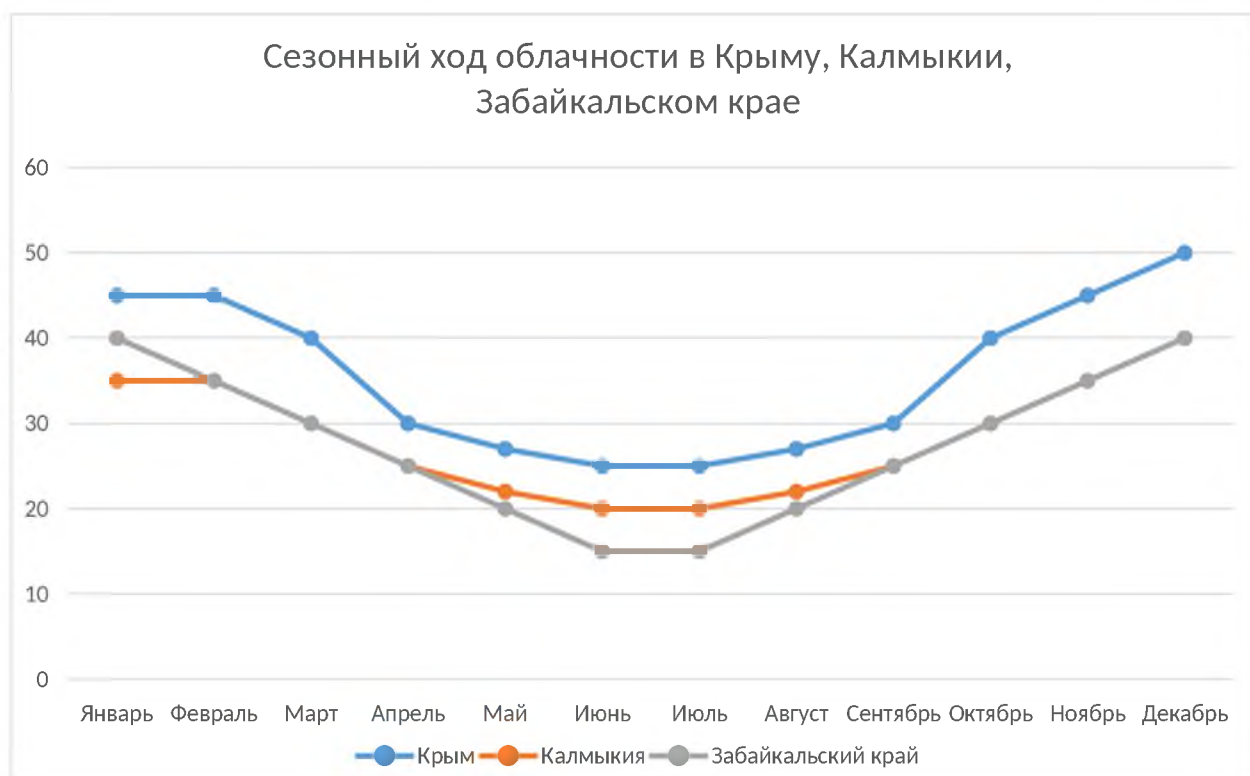


Рисунок 1.3 – Сезонный ход облачности в исследуемых регионах

Экстремальные явления существенно влияют на проектирование СЭС. В Калмыкии пыльные бури (5–10 дней/год, март–апрель, скорость ветра 10–15 м/с) снижают КПД на 10–15% из-за оседания пыли [6].

Частота бурь выше в западных районах (Яшалтинский), чем в юго-

востоке (Черноземельский). На рисунке 1.4 обозначены зоны риска экстремальных явлений в Калмыкии, выделяя юго-восток как менее подверженный пыльным бурям.

Рисунок 1.4 – Зоны рисков экстремальных явлений в Калмыкии

- ~ Пылеотталкивающие покрытия и очистка (2–3 раза/сезон, как в Малых Дербетах);
- ~ Панели на высоте 0,5–1 м (как в Калмыкской СЭС №1);
- ~ Размещение вдали от эрозионных зон.

рисунке 1.5 показаны зоны риска экстремальных явлений в Крыму, подчёркивающие приоритетность степных районов (западных и восточных) с меньшей грозовой активностью.

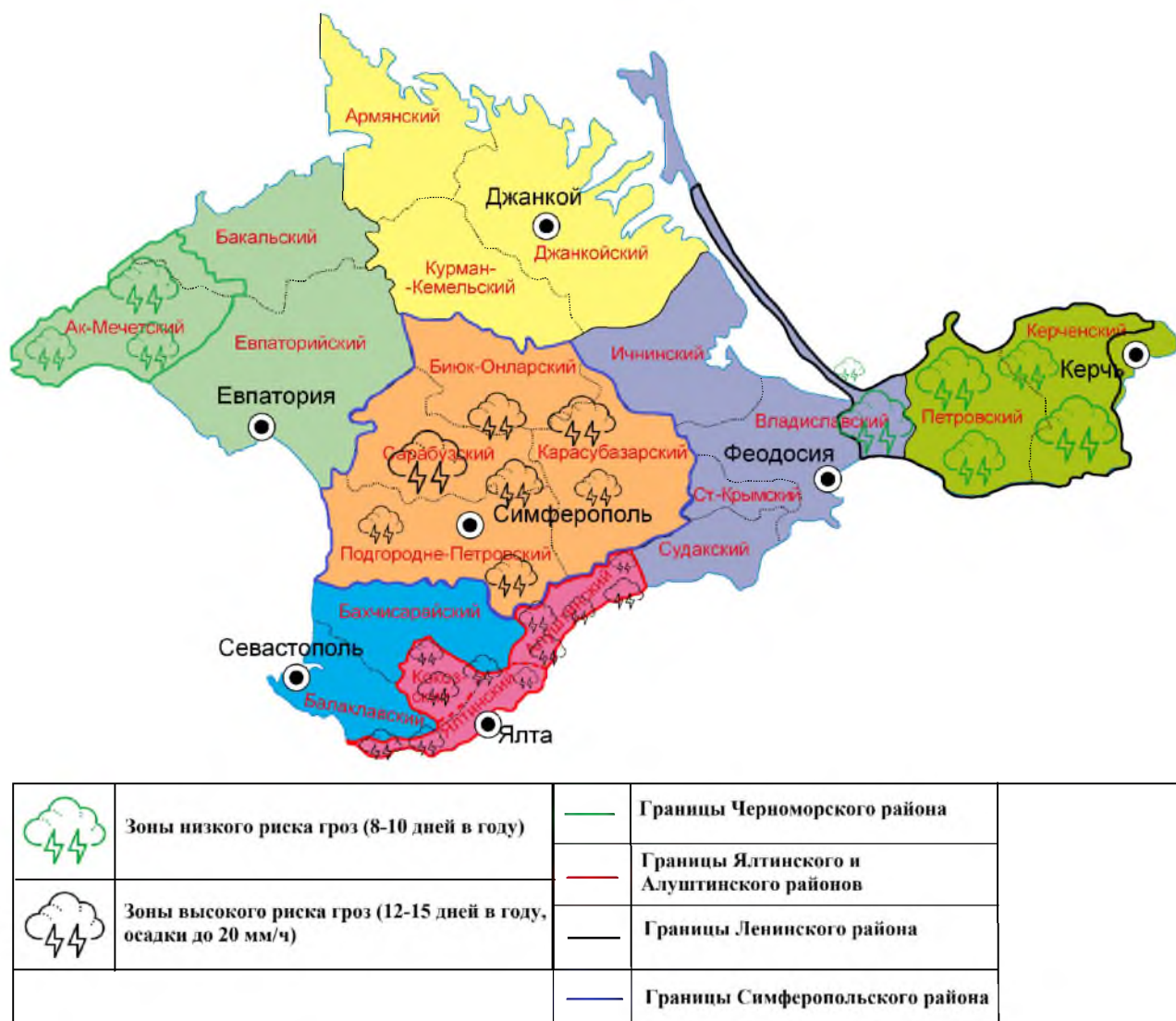


Рисунок 1.5 – Зоны рисков экстремальных явлений в Крыму

В соответствии с этим принимаются меры:

- ~ Ветроустойчивые конструкции и молниезащита (как в СЭС «Перово»);
- ~ Мониторинг погоды и отключение во время штормов;
- ~ Размещение в степи (Ленинский район), где гроз меньше (8–10 дней/год).

Забайкалье сталкивается с морозами (-45°C , до 60 дней/год), снежными

заносами (10–30 см в юге, до 40 см на севере, 20–60 дней/год) и ветрами (порывы 10–12 м/с) [14]. Снег снижает выработку на 20–50%, с нагрузкой 200–300 кг/м². На рисунке 1.6 представлены зоны риска экстремальных явлений в Забайкальском крае, акцентирующие юго-восток с минимальной снеговой нагрузкой.



Рисунок 1.6 – Зоны рисков экстремальных явлений в Забайкальском крае

- Соответствующие меры:
- ~ Морозостойкие панели (КПД >18%, до -40 °С) и нагрев аккумуляторов (как в Чарском районе);
 - ~ Наклон 40–45° и системы очистки (щетki, нагрев);
 - ~ Размещение в юго-востоке (Борзя), где снег минимален (10–15 см).
- Температура и влажность влияют на КПД панелей и аккумуляторов. В

Калмыкии лето жаркое ($+30...+40$ °С, июль), зима мягкая ($-5...-10$ °С), с влажностью 50–60% [6]. Жара снижает КПД на 0,5%/10 °С выше 25 °С, требуя вентиляции, как в СЭС Малые Дербеты. Низкая влажность минимизирует коррозию.

Крым имеет стабильные температуры: лето $+23...+30$ °С, зима $0...+5$ °С, с влажностью 50–60% в степи и 70–80% на ЮБК [22]. Умеренная жара и морская стабилизация (перепады <10 °С) поддерживают долговечность, как в крышных СЭС Евпатории. Высокая влажность ЮБК требует профилактики коррозии.

Забайкалье отличается амплитудой 70 °С: лето $+30...+40$ °С, зима $-30...-45$ °С, влажность 40–50%. Морозы снижают КПД аккумуляторов на 20–30%, требуя нагрева, как в Чарском районе. Жара компенсируется вентиляцией, а низкая влажность исключает коррозию.

Ветры влияют на вентиляцию, снеговое сдувание и нагрузки. В Калмыкии ветры 4–6 м/с (порывы до 15 м/с) усиливают пыльные бури, но способствуют охлаждению панелей [6]. Конструкции с нагрузкой 40 м/с применяются в СЭС Малые Дербеты.

Крым имеет бризы 3–5 м/с и сезонные ветры 5–8 м/с (порывы до 15 м/с), особенно на востоке. Вентиляция снижает перегрев, но требует ветрозащиты, как в СЭС «Перово». Снег сдувается редко из-за слабых зимних ветров.

Забайкалье характеризуется ветрами 3–5 м/с (порывы 10–12 м/с зимой), сдувающими снег в юге (Борзя), но создающими нагрузку до 50 м/с. Конструкции в СЭС Унда адаптированы к ветрам, а вентиляция минимизирует летний перегрев.

Метеорологическое обоснование размещения СЭС

Метеоусловия определяют оптимальные площадки. В Калмыкии юго-восток (Черноземельский район, 1500 кВт·ч/м², облачность 20%) минимизирует пыльные риски, как в Калмыкской СЭС №1 (25 МВт). В Крыму степные районы (Ленинский, 1450 кВт·ч/м², 20–25% облачности) предпочтительны для наземных СЭС, как «Перово», и крышных в Евпатории. В Забайкалье юго-

восток (Борзя, Мангут, 1300–1400 кВт·ч/м², 15–20% облачности) идеален для автономных СЭС, как Унда, с минимальными снеговыми рисками (10–15 см). Трекинговые системы, гибридные решения и метеомониторинг повышают КПД во всех регионах. На рисунке 1.7 отображена инсоляция и облачность перспективных площадок в Калмыкии, Крыму и Забайкалье, подтверждающая их высокий радиационный потенциал (от 1300 до 1550 кВт·ч/м²).

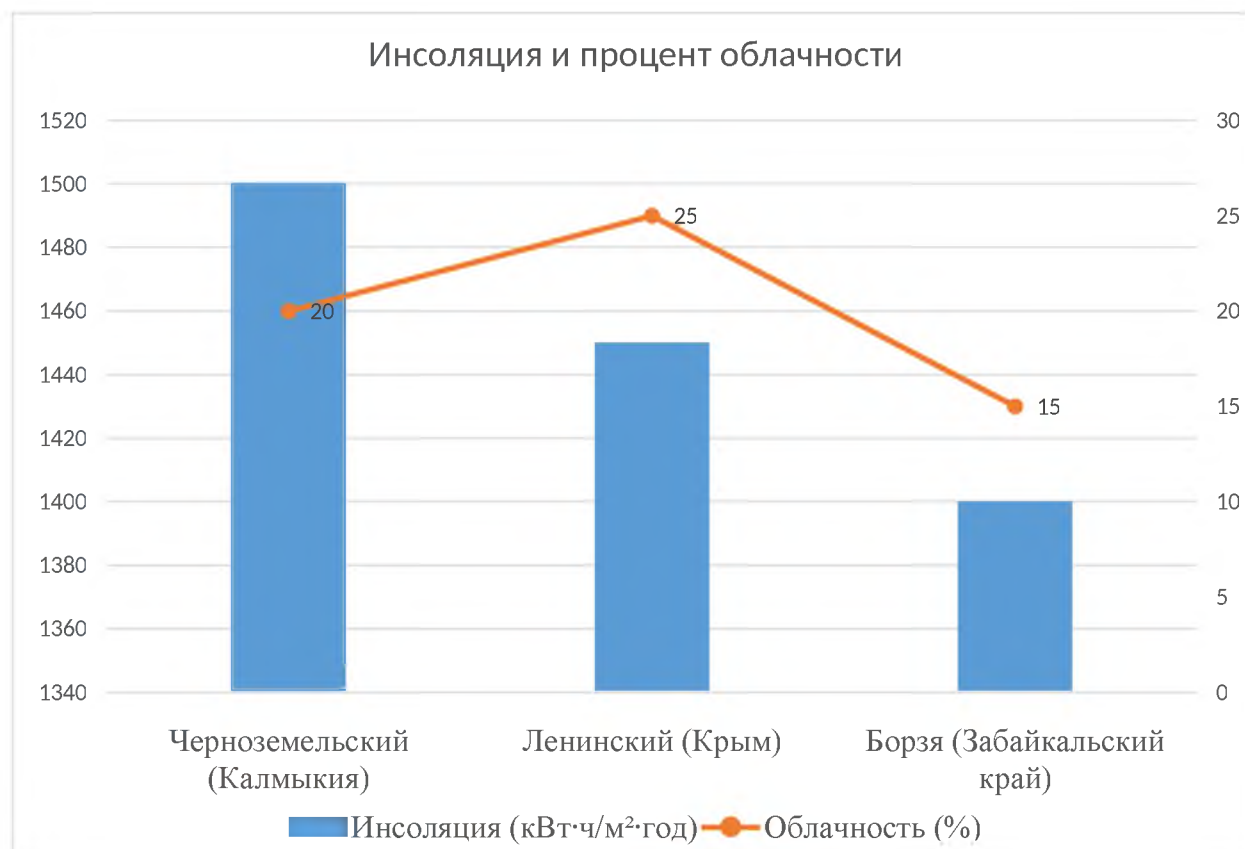


Рисунок 1.7 – Инсоляция и облачность оптимальных площадок

Метеорологические условия Калмыкии, Крыма и Забайкальского края — высокая инсоляция (1300–1500 кВт·ч/м²), низкая облачность (15–30%), 240–280 солнечных дней, стабильный радиационный режим — создают прочные предпосылки для СЭС.

Углубленный анализ радиации, облачности, экстремальных явлений, температур, влажности и ветров позволяет выявить приоритетные зоны: юго-восток Калмыкии, степной Крым, юг Забайкалья. Опыт СЭС (Малые Дербеты, «Перово», Унда) подтверждает эффективность адаптаций к пыли, грозам, снегам и морозам. Долгосрочные тренды радиации и сияния усиливают

потенциал, делая регионы перспективными для масштабирования солнечной энергетики.

1.2 Орографические предпосылки и их роль в эффективности СЭС

Орографические условия — это совокупность факторов рельефа местности, которые влияют на климат, погоду, гидрологические процессы и другие природные явления. Орографические особенности Калмыкии, Крыма и Забайкальского края существенно влияют на эффективность солнечных электростанций (СЭС), определяя доступность солнечной радиации, степень затенения, снеговую и ветровую нагрузку, а также логику строительства и эксплуатации.

Рельеф определяет угол падения солнечных лучей, длительность освещения и степень затенения, формируя радиационный режим площадок для СЭС. В Калмыкии преобладает равнинный рельеф Прикаспийской низменности (высоты $-13 \dots 100$ м, уклоны $< 1^\circ$), исключая затенение и обеспечивающий открытый горизонт на 360° .

Среднегодовая инсоляция достигает $1400\text{--}1500$ кВт·ч/м² ($5040\text{--}5400$ МДж/м²), с максимумом в юго-востоке (Черноземельский район, 1550 кВт·ч/м²) благодаря плоскому ландшафту и отсутствию препятствий [6, с. 73]. Оптимальный угол наклона панелей ($30\text{--}35^\circ$, широта $46\text{--}47^\circ$ с.ш.) максимизирует поглощение радиации, как в СЭС Малые Дербеты (5 МВт, выработка $7,5$ млн.кВт·ч/год), где равнины позволили установить трекинговые системы, увеличивающие КПД на $20\text{--}30\%$. Ергенинская возвышенность (запад Калмыкии, высоты до 220 м) создаёт незначительные уклоны ($1\text{--}3^\circ$), снижая радиацию на $2\text{--}5\%$ из-за локального затенения, что делает её менее приоритетной [19, с. 103].

Крым сочетает равнинные степи (70% территории, высоты $10\text{--}150$ м, уклоны $< 2^\circ$) и горные хребты Крымских гор (юг, высоты до 1547 м, уклоны $10\text{--}30^\circ$). Степные районы (Ленинский, Черноморский) с инсоляцией $1350\text{--}1450$

кВт·ч/м² (4861–5150 МДж/м²) обеспечивают стабильную выработку благодаря отсутствию затенения, как в СЭС «Перово» (105,56 МВт, 130 млн.кВт·ч/год) [11].

Предгорья (Бахчисарайский район, уклоны 5–15°) усиливают радиацию на 5–10% за счёт южной экспозиции, но холмистость усложняет установку трекинговых систем. Горные зоны Южного берега Крыма (ЮБК, Ялта) ограничены из-за затенения (до 20% светового дня) и локальной облачности, вызванной рельефом, снижающей радиацию до 1300 кВт·ч/м² [22]. Наклон панелей 30–35° (широта 44–46° с.ш.) оптимален для степных равнин, где альbedo почв (15–20%) компенсирует морское влияние [9, с. 162].

Забайкальский край характеризуется сложным рельефом, включающим равнины (юг, высоты 300–800 м, уклоны <5°), холмистые плато (центр, уклоны 5–20°) и горные хребты (Яблоновский, Становой, север, высоты до 2000 м, уклоны 20–40°). Южные равнины (Борзя, Мангут) с инсоляцией 1300–1400 кВт·ч/м² (4680–5040 МДж/м²) исключают затенение, как в СЭС Унда (150 кВт, 0,2 млн.кВт·ч/год). Холмы с южной экспозицией (Читинский район) усиливают радиацию на 5–10%, поддерживая выработку в СЭС Чарского района (1 МВт). Северные горы (Чара, Каларский район) теряют до 25% радиации из-за затенения и облачности, ограничивая их пригодность. Наклон панелей 35–40° (широта 50–53° с.ш.) и трекинговые системы повышают КПД на 30–35%, особенно на холмах [14, с. 99].

Экспозиция склонов определяет угол падения солнечных лучей, влияя на радиационный баланс и эффективность СЭС. В Калмыкии равнинный рельеф (уклон ~0°) обеспечивает равномерное освещение без вариаций экспозиции. Угол падения лучей в июне (~67°, высота солнца) даёт радиацию 6.8 кВт·ч/м²·день, в декабре (~20°) — 1.8 кВт·ч/м²·день, без потерь от рельефа [6]. Панели, ориентированные на юг под углом 35°, как в Калмыкской СЭС №1 (25 МВт, Черноземельский район), максимизируют выработку круглый год. Отсутствие склонов исключает необходимость корректировки азимута, упрощая проектирование.

Забайкалье отличается холмистыми плато с южными склонами (уклоны $5\text{--}20^\circ$), увеличивающими радиацию на $7\text{--}12\%$. В июне (угол солнца $\sim 65^\circ$) склоны с уклоном 15° дают радиацию $7.2 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2\cdot\text{день}$, в декабре ($\sim 18^\circ$) — $1.2 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2\cdot\text{день}$ с усилением до 12% . Северные склоны и котловины (Чара) теряют до 25% радиации, ограничивая СЭС. Равнины Борзи, как в СЭС Унда, исключают затенение, а наклон 40° оптимизирует выработку. Трекинговые системы на холмах Чарского района повышают КПД на $30\text{--}35\%$.

На рисунке 1.8 показан угол падения солнечных лучей на различный рельеф в исследуемых регионах, демонстрирующий усиление радиации на южных склонах (наклон $5\text{--}12$ градусов).

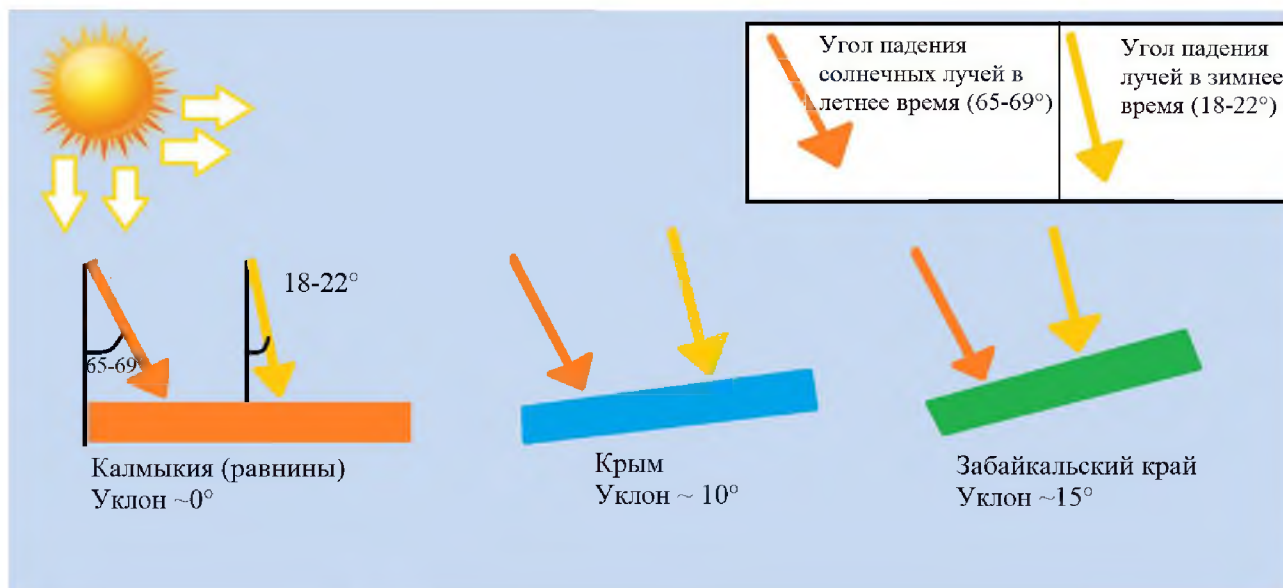


Рисунок 1.8 – Угол падения солнечных лучей на различный рельеф

Рельеф влияет на снеговую и ветровую нагрузку, определяя конструктивные требования СЭС. В Калмыкии снеговая нагрузка минимальна ($<10 \text{ см}$, $5\text{--}10 \text{ дней/год}$, $50\text{--}100 \text{ кг}/\text{м}^2$), а равнины снижают ветровую турбулентность ($4\text{--}6 \text{ м}/\text{с}$, порывы до $15 \text{ м}/\text{с}$).

Конструкции СЭС Малые Дербеты рассчитаны на нагрузку $40 \text{ м}/\text{с}$, а наклон панелей 35° обеспечивает самоочистку от редкого снега. Песчаные бури, усиленные равнинами, требуют эрозионной защиты (геотекстиль), как в Калмыкской СЭС №1.

Крым характеризуется незначительным снеговым покровом в степи (<5

см, 5–10 дней/год, 30–50 кг/м²), но в горах (Ай-Петри, до 20 см, 150 кг/м²) нагрузка возрастает, ограничивая СЭС. Ветры (5–8 м/с, порывы до 15 м/с) усиливаются в предгорьях, создавая нагрузку до 40 м/с, как в СЭС «Перово» [22, с. 102]. Забайкалье сталкивается с высокой снеговой нагрузкой: юг (Борзя, 10–15 см, 100–150 кг/м², 20–30 дней/год), север (Чара, 30–40 см, 200–300 кг/м², 60 дней/год) [14, с. 117].

На рисунке 1.9 представлена столбчатая диаграмма, сравнивающая среднюю снеговую нагрузку в Калмыкии (75 кг/м²), Крыму (40–150 кг/м²) и Забайкальском крае (125–250 кг/м²), подчёркивающая минимальные значения в степных зонах и высокие в северных районах Забайкалья. Сравнение снеговой нагрузки в различной местности исследуемых регионов можно увидеть на рисунке 1.9.



Рисунок 1.9 – Сравнение снеговой нагрузки в регионах

В таблице 1.2 представлены орографические предпосылки для размещения СЭС в Калмыкии, Крыму и Забайкальском крае, иллюстрирующие

влияние рельефа и почв на выбор площадок

Таблица 1.2 – Орографические предпосылки для размещения СЭС

Параметр	Калмыкия	Крым	Забайкальский край
Преобладающий рельеф	Равнины (0-100 м)	Равнины, горы (10-1500 м)	Равнины, холмы (300-2000 м)
Затенение (%)	0	0-20 (горы)	0-25 (север)
Экспозиция склонов	Нет (равнины)	Южные, 5–15° (предгорья)	Южные, 5-20° (холмы)
Снеговая нагрузка (см)	<10	<5 (степь), 20 (горы)	10-30(юг),40 (север)
Почвы	Песчаные, супесчаные	Чернозёмы	Степные, каменистые
Меры адаптации	Эрозионная защита	Ветрозащита	Снеговая очистка

Характеристики подстилающей поверхности влияют на альбедо, эрозию, тепловой режим и строительство СЭС. В Калмыкии песчаные и супесчаные почвы (альбедо 10–15%) нагреваются до +50 °С летом, повышая температуру панелей и снижая КПД на 0,5%/10 °С выше 25 °С. Эрозия от песчаных бурь требует геотекстиля, как в Калмыкской СЭС №1. Лёгкие почвы упрощают фундаменты, снижая затраты на 10–15% по сравнению с чернозёмами.

Крым имеет плодородные чернозёмы в степи (альбедо 15–20%), увеличивающие рассеянную радиацию на 5–10%, как в СЭС «Перово». Плотные почвы усложняют фундаменты, требуя свай, что повышает затраты на 20%. В горах (ЮБК) каменистые почвы (альбедо 10–12%) снижают эрозию, но увеличивают логистические расходы.

Забайкалье характеризуется степными и каменистыми почвами в юге (альбедо 10–12%), минимизирующими эрозию и упрощающими фундаменты, как в СЭС Унда. Каменистость повышает устойчивость, но требует бурения. Северные мерзлотные почвы (Чара) ограничивают строительство из-за сезонного оттаивания. Низкое альбедо юга оптимизирует радиацию. На рисунке 1.10 показано альбедо различных типов почвы регионов.

Рельеф создаёт специфические риски для СЭС. В Калмыкии песчаные равнины подвержены эрозии от бурь (5–10 дней/год), угрожающей

фундаментам. Геотекстиль и ветрозащитные полосы, как в СЭС Малые Дербеты, снижают риск на 80%. Затопление в Прикаспийской низменности (редко, 1–2 раза/10 лет) требует возвышенных площадок.

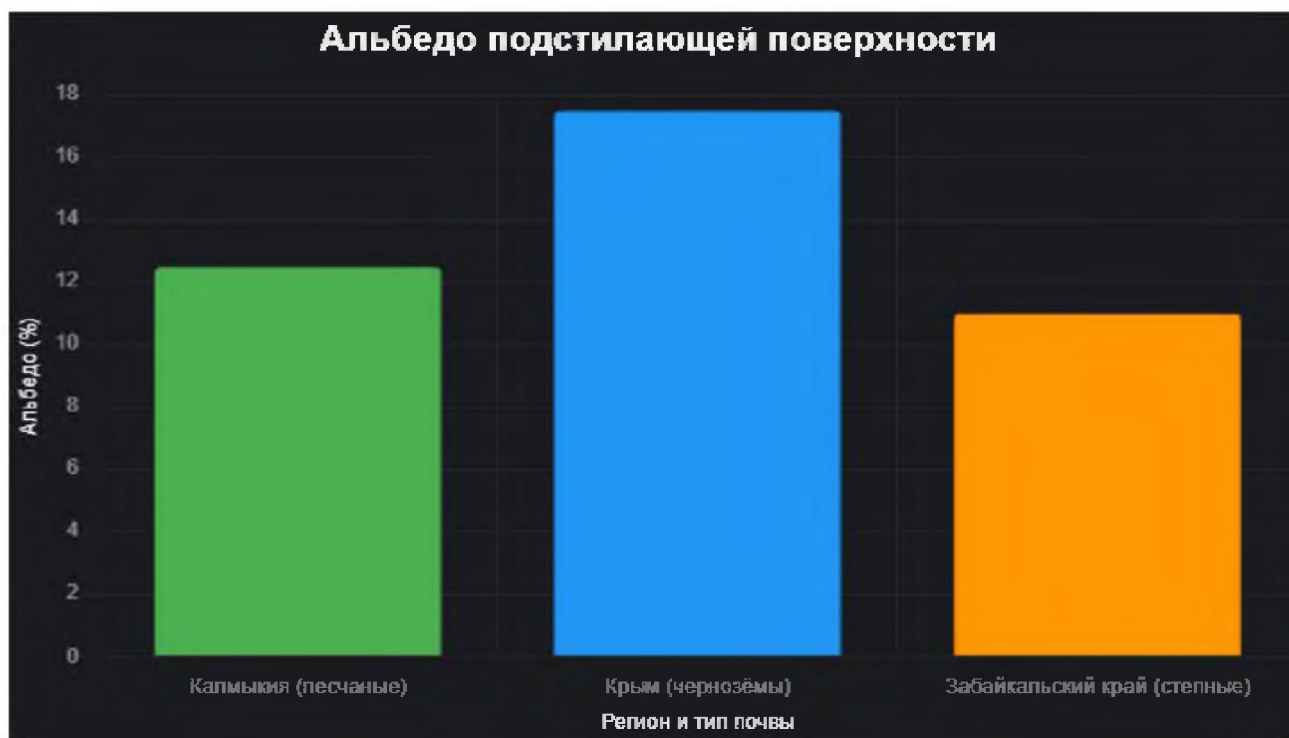


Рисунок 1.10 – Альbedo подстилающей поверхности

Крым сталкивается с оползнями в предгорьях (Бахчисарайский район, 1–3 случая/год) и редкими затоплениями в степи (Ленинский район, 1 раз/5 лет). Укрепление склонов и дренажные системы, как в СЭС «Перово», минимизируют риски. Горные зоны ЮБК непригодны из-за оползней и затенения [22].

Забайкалье подвержено затоплениям вдоль рек (Ингода, Шилка, 1–2 раза/10 лет) и оттаиванию мерзлоты на севере (Чара), дестабилизирующему фундаменты. Возвышенные равнины Борзи и свай, как в СЭС Унда, исключают риски. Холмы снижают затопление, но увеличивают ветровую нагрузку.

Орографические условия Калмыкии, Крыма и Забайкалья сравниваются с Краснодарским краем (равнины, чернозёмы, инсоляция ~ 1350 кВт·ч/м²) и Алтаем (горы, снег 50 см, инсоляция 1200–1300 кВт·ч/м²). Краснодарский край уступает из-за конкуренции за равнинные земли и высокой облачности

(35–45%), снижающей радиацию. Алтай ограничен горами, затенением (30%) и снегом (300–400 кг/м²), делая СЭС менее рентабельными. Международный пример — равнины Андалусии (Испания, инсоляция 1800 кВт·ч/м²) — подтверждают преимущества равнин Калмыкии и Крыма, но требуют меньших адаптаций к снегу и ветру.

В таблице 1.3 приведено сравнение орографических условий регионов, где видны преимущества равнин Калмыкии и Крыма и южных холмов Забайкалья для СЭС.

Таблица 1.3 – Сравнение орографических условий регионов

Параметр	Калмыкия	Крым	Забайкальский край	Краснодарский край	Алтай
Рельеф (высоты)	Равнины (0-100 м)	Равнины, горы (10-1500м)	Равнины, холмы (300-2000 м)	Равнины (0-500 м)	Горы (500-2000 м)
Затенение (%)	0	0-20	0-25	0-5	20-30
Снеговая нагрузка (кг/м ²)	50-100	30-150	100-300	50-100	300-400
Альбедо почв (%)	10-15	15-20	10-12	15-20	10-15
Риски	Эрозия	Оползни, затопление	Затопление, мерзлота	Затопление	Снег, оползни

Орографические предпосылки Калмыкии, Крыма и Забайкальского края – равнинные и пологосклонные ландшафты с южной экспозицией, минимальным затенением и низкой снеговой нагрузкой – создают уникальные условия для СЭС.

Равнины Калмыкии, степи Крыма и южные холмы Забайкалья обеспечивают максимальную инсоляцию, упрощают логистику и минимизируют риски.

Углы падения лучей, снеговые и ветровые нагрузки, свойства почв и орографические риски требуют адаптаций, таких как трекинговые системы, усиленные конструкции и эрозионная защита, успешно реализованные в СЭС Малые Дербеты, «Перово» и Унда.

Сравнение с Краснодарским краем, Алтаем и Андалусией подчёркивает преимущества исследуемых регионов, делая их приоритетными для масштабирования солнечной энергетики [7, с. 111].

В соответствии с полученными данными, делаем обоснованный выбор перспективных площадок для СЭС:

~ Калмыкия: Черноземельский район (инсоляция 1550 кВт·ч/м², облачность 20%, равнины, песчаные почвы). Преимущества: минимальная эрозия, доступные земли (1000+ га), низкая снеговая нагрузка (<10 см). Риски: пыльные бури (3–5 дней/год). Адаптации: геотекстиль, трекинг-системы. Потенциал: СЭС мощностью 50–100 МВт с КИУМ 15%.

~ Крым: Ленинский район (инсоляция 1450 кВт·ч/м², облачность 25%, равнины, чернозёмы). Преимущества: 250+ солнечных дней, низкие грозы (8–10 дней/год), спрос туризма. Риски: конкуренция за землю. Адаптации: крышные СЭС, молниезащита. Потенциал: 20–50 МВт наземных и 10 МВт крышных СЭС.

~ Забайкальский край: Борзинский район (инсоляция 1400 кВт·ч/м², облачность 15%, равнины, каменистые почвы). Преимущества: сияние 2900 часов, сдувание снега, малозаселённость. Риски: морозы (–45 °С), снег (10–15 см). Адаптации: гибридные системы, очистка. Потенциал: 10–30 МВт автономных СЭС.

Сравнение с Краснодарским краем (инсоляция ~1350 кВт·ч/м², облачность 35%) и Алтаем (1200–1300 кВт·ч/м², снег 50 см) подчёркивает преимущества исследуемых регионов. Краснодарский край ограничен конкуренцией за землю и грозами (15–20 дней/год), Алтай — горами и снегом [8].

Международный пример – Андалусия (Испания, 1800 кВт·ч/м²) – показывает, что равнины Калмыкии и Крыма близки по потенциалу, но требуют адаптаций к местным рискам.

В таблице 1.4 представлены метеорологические и орографические характеристики перспективных площадок в Калмыкии (Черноземельский

район), Крыму (Ленинский район) и Забайкальском крае (Борзинский район).

Таблица 1.4 – Метеорологические и орографические характеристики перспективных площадок в исследуемых регионах

Параметр	Черноземельский (Калмыкия)	Ленинский (Крым)	Борзинский (Забайкальский край)
Инсоляция (кВт·ч/м ² ·год)	1550	1450	1400
Облачность летом (%)	20	25	15
Рельеф	Равнины (0–100 м)	Равнины (10–150 м)	Равнины (300–800 м)
Снег (см)	<10	<5	10–15
Возможные риски	Пыльные бури	Грозы, конкуренция за землю	Снег, морозы
Потенциал (МВт)	50–100	20–50	10–30

На рисунке 1.11 отображена инсоляция перспективных площадок в Калмыкии, Крыму и Забайкалье, как основной параметр, подчёркивающий пригодность для СЭС (1400–1550 кВт·ч/м²).



Рисунок 1.11 – Инсоляция перспективных площадок в регионах

Рисунок 1.11 иллюстрирует коэффициент использования установленной мощности (КИУМ, %) для трёх перспективных площадок размещения новых СЭС: Черноземельский район (Калмыкия), Ленинский район (Крым) и Борзинский район (Забайкальский край). КИУМ отражает эффективность преобразования солнечной радиации в электроэнергию, зависящую от метеорологических (инсоляция, облачность, экстремальные явления) и орографических (рельеф, затенение) условий. Черноземельский район демонстрирует наивысший КИУМ (15%) благодаря инсоляции 1550 кВт·ч/м²·год, низкой облачности (20% летом) и равнинному рельефу, минимизирующему затенение и потери от пыльных бурь. Борзинский район с КИУМ 14% выигрывает за счёт сияния до 2900 часов/год и сдувания снега ветрами (3–5 м/с), несмотря на морозы и снеговую нагрузку (10–15 см). Ленинский район имеет КИУМ 13% из-за инсоляции 1450 кВт·ч/м²·год и 250+ солнечных дней, но грозы (8–10 дней/год) и морская облачность (25%) ограничивают выработку. На рисунке 1.12 изображено сравнение коэффициентов использования установленной мощности (КИУМ) трёх площадок.



Рисунок 1.12 – Сравнение КИУМ перспективных площадок.

Черноземельский (Калмыкия): КИУМ 15% обусловлен высокой

инсоляцией ($1550 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2\cdot\text{год}$), низкой облачностью (20% летом) и равнинным рельефом, минимизирующим затенение. Пыльные бури (3–5 дней/год) незначительно снижают выработку, как в проекте Калмыкской СЭС №1.

Ленинский (Крым): КИУМ 13% связан с инсоляцией $1450 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2\cdot\text{год}$ и 250+ солнечными днями, но грозы (8–10 дней/год) и морская облачность (25% летом) ограничивают эффективность, как в СЭС «Перово» [11].

Борзинский (Забайкальский край): КИУМ 14% достигается благодаря инсоляции $1400 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2\cdot\text{год}$ и сиянию до 2900 часов/год, но снеговые заносы (10–15 см, 20–30 дней/год) и морозы ($-45 \text{ }^{\circ}\text{C}$) требуют адаптаций, как в СЭС Унда. Данное сравнение подчёркивает метеорологическую и географическую эффективность выбранных площадок, поддерживая их приоритетность для масштабирования СЭС.

2 Орография и климатические ресурсы исследуемых регионов для солнечной энергетики

2.1 Климатические и орографические особенности Калмыкии для эксплуатации СЭС

Республика Калмыкия, расположенная в сухостепной и полупустынной зоне юга Европейской части России, обладает уникальными метеорологическими и орографическими условиями, создающими высокий потенциал для солнечной энергетики. Высокая инсоляция, минимальная облачность, скудные осадки и равнинный рельеф делают регион одним из лидеров среди субъектов РФ по климатической пригодности для солнечных электростанций (СЭС). Эти характеристики, подкрепленные опытом действующих станций и локальными микроклиматическими особенностями, подчеркивают перспективность Калмыкии для развития как сетевых, так и автономных СЭС, несмотря на вызовы, связанные с пыльными бурями и запыленностью атмосферы.

Калмыкия характеризуется резко континентальным климатом с жарким засушливым летом и короткой малоснежной зимой, что обеспечивает благоприятные условия для круглогодичной работы СЭС. Среднегодовая суммарная солнечная радиация составляет 1400–1500 кВт·ч/м², достигая 1550 кВт·ч/м² в юго-восточных районах (Черноземельский, Яшкульский) [6, с. 53], [25]. Доля прямой радиации — 70–75%, что оптимально для фотоэлектрических панелей, эффективных при прямом излучении [23]. Сезонное распределение радиации показывает пик в июне–июле (6,5–7,0 кВт·ч/м²·день) и минимум в декабре–январе (1,8–2,2 кВт·ч/м²·день), что требует учета зимнего снижения выработки при проектировании станций.

Облачность минимальна: летом 20–25%, зимой 30–40%, а число солнечных дней превышает 240 в год [6, с. 60]. Это обеспечивает стабильную выработку, особенно в теплый период (апрель–октябрь), когда доля ясных дней достигает 80%. Осадки скудные — менее 300 мм/год, преимущественно в виде

кратковременных ливней, что снижает риск затенения и коррозии оборудования. Температурный режим включает жаркое лето (+30...+35 °С, с пиками до +40 °С) и умеренно холодную зиму (–5...–10 °С, редко до –20 °С). Высокие летние температуры могут снижать КПД панелей на 0,5% на каждые 10 °С выше 25 °С, но низкая влажность (50–60%) минимизирует конденсацию и износ.

Микроклимат Калмыкии варьируется в зависимости от зональности: западные районы (Городовиковский, Сарпинский) имеют более высокую влажность (до 70%) и осадки (350 мм/год), тогда как юго-восток (Черноземельский, Лаганский) — экстремально засушлив (200–250 мм/год). Юго-восточные районы, включая Прикаспийскую низменность, отличаются повышенной инсоляцией (до 1550 кВт·ч/м²) за счет меньшей запыленности и более устойчивых антициклональных условий [6]. Ветровой режим также влияет на микроклимат: средняя скорость ветра 4–6 м/с, с пиками до 15 м/с в марте–апреле, усиливает пылевую эрозию, но способствует вентиляции панелей, снижая перегрев. Локальные вариации радиации наблюдаются вблизи крупных водоемов (например, озеро Маныч), где повышенная влажность снижает долю прямой радиации на 5–10%. Эти особенности требуют дифференцированного подхода к выбору площадок для СЭС, отдавая предпочтение юго-восточным районам с минимальной облачностью и запыленностью.

Рельеф Калмыкии преимущественно равнинный, с высотами от –13 м (Прикаспийская низменность) до 100 м (Ергенинская возвышенность), что исключает затенение и упрощает установку модулей. Степные ландшафты, занимающие 80% территории, обеспечивают открытый горизонт, позволяя панелям улавливать радиацию в течение светового дня. Песчаные и супесчаные почвы (альбедо 10-15%) облегчают строительство фундаментов, но требуют защиты от эрозии [15, с. 203]. Оптимальный угол наклона панелей (30–35°, для юго-востока до 40°) соответствует широте региона (46–47° с.ш.) и максимизирует выработку.

В Прикаспийской низменности плоский рельеф позволяет использовать трекинговые системы, увеличивающие выработку на 20–30% [6]. Низкая снеговая нагрузка (5–10 дней/год, толщина <10 см) исключает необходимость сложных систем очистки зимой.

Примеры действующих СЭС:

СЭС в Малых Дербетах (Яшалтинский район): Введена в 2020 году, мощность 5 МВт, включает 15000 монокристаллических панелей (КПД 18–20%), ориентированных на юг под углом 32°. Инсоляция 1450 кВт·ч/м² и низкая облачность (22% летом) обеспечивают выработку 7,5 млн.кВт·ч/год, покрывая потребности 1000 домохозяйств и социальной инфраструктуры. Равнинный рельеф и отсутствие затенения повышают эффективность, а пылеотталкивающие покрытия минимизируют потери от пыльных бурь [19, с. 93].



Рисунок 2.1 – СЭС «Малые Дербеты»

Изображение показывает массив фотоэлектрических панелей СЭС Малые

Дербеты (рисунок 2.1), расположенных на равнинной степной местности Яшалтинского района. Панели ориентированы на юг под углом 32° , установлены на металлических рамах высотой 0,5 м, с пылеотталкивающими покрытиями для защиты от пыльных бурь. На заднем плане виден открытый горизонт, подчёркивающий отсутствие затенения, и сухая степная растительность, характерная для низкой облачности (20–25% летом) и высокой инсоляции ($1450 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$).



Рисунок 2.2 – Снимок Малодербетовской СЭС со спутника на карте ГИС

СЭС располагается примерно на $46^\circ 20'$ с.ш., $42^\circ 10'$ в.д. Изображение (рисунок 2.2) показывает равнинный рельеф (высоты 50–100 м), отсутствие значительных возвышенностей и близость к линиям электропередач (ЛЭП) в радиусе 5 км. На карте видны степные ландшафты и дороги, обеспечивающие логистику.

~ Калмыкская СЭС №1 (Черноземельский район): Проект ООО «Солар Системс», мощность 25 МВт, планируемая выработка 33,5 млн.кВт·ч/год, КИУМ 14,2% [6, с.120]. КИУМ (Коэффициент использования установленной мощности) – показатель эффективности СЭС, выражающий отношение

фактической выработки электроэнергии к максимальной возможной при непрерывной работе на номинальной мощности, измеряемый в процентах.

~ Станция у пос. Комсомольский использует 100 000 панелей (0,27 кВт каждая), ориентированных на юг. Высокая инсоляция ($1550 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$) и минимальная облачность (20%) обеспечивают стабильность, а равнинный рельеф упрощает строительство на 75 га. Проект находится на стадии проектирования, но демонстрирует метеорологический потенциал юго-востока Калмыкии.

~ Опытно-экспериментальная батарея в Адые (Черноземельский район): Установлена в пос. Адык (СПК «Первомайский»), мощность 40 Вт, включает стационарный модуль (азимут 170° , угол 60°) для питания светодиодных панелей [6]. Низкая облачность и высокая радиация ($1500 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$) обеспечивают стабильную работу, а равнинный рельеф исключает затенение. Проект подтверждает пригодность автономных систем для удаленных хозяйств.

~ Солнечные панели в Элисте: Установлены на объектах инфраструктуры (светофоры, уличные фонари), мощность до 1 кВт на объект. Низкая облачность и 240+ солнечных дней обеспечивают надежность, а городское расположение минимизирует пылевые риски.

Метеорологические вызовы:

Основной риск – пыльные бури (5–10 дней/год, март–апрель), вызванные эрозией почв, снижающие КПД панелей на 10–15%. Адаптационные меры включают:

~ Регулярную очистку (2–3 раза в сезон);

~ Пылеотталкивающие покрытия (как в Малых Дербетах);

~ Установку панелей на высоте 0,5–1 м (как в Адые).

Умеренная ветровая активность (4–6 м/с, порывы до 15 м/с) требует усиленных креплений, но способствует вентиляции панелей. Снежный покров редок, а наклон панелей обеспечивает самоочистку. Высокие летние температуры компенсируются выбором монокристаллических панелей с низким

температурным коэффициентом ($<0,4\%/^{\circ}\text{C}$) и системами вентиляции.

Для оценки метеорологического потенциала Калмыкии целесообразно сравнить ее с Краснодарским краем и Астраханской областью, расположенными в схожих климатических зонах (степная и полупустынная), но отличающимися по метеоусловиям. Краснодарский край имеет инсоляцию $1350 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$, но высокая облачность (35–45%) и осадки (600–800 мм/год) снижают долю прямой радиации до 60%, увеличивая затраты на обслуживание. Астраханская область близка по инсоляции ($\sim 1350 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$), но повышенная влажность (60–70%) и запыленность (из-за близости пустынь) усложняют эксплуатацию СЭС. Калмыкия, с ее низкой облачностью (20–25%) и минимальными осадками ($<300 \text{ мм/год}$), обеспечивает более стабильную выработку и меньшие эксплуатационные расходы. Сравнение подчеркивает преимущества Калмыкии для наземных и автономных СЭС, особенно в юго-восточных районах.

В таблице 2.1 представлены климатические характеристики Калмыкии, подчёркивающие высокую инсоляцию ($1400\text{--}1550 \text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$) и низкую облачность, обеспечивающие стабильную выработку СЭС.

Таблица 2.1 – Сравнение климатических характеристик регионов

Параметр	Калмыкия	Краснодарский край	Астраханская область
Инсоляция ($\text{кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2\cdot\text{год}$)	1400-1550	~ 1350	~ 1350
Облачность летом (%)	20-25	35-45	30-35
Осадки (мм/год)	<300	600-800	300-400
Доля прямой радиации (%)	70-75	~ 60	~ 65
Пыльные бури (дней/год)	5-10	0-2	10-15
Влажность (%)	50-60	70-80	60-70

Из сравнения можно сделать вывод, что Калмыкия превосходит Краснодарский край по стабильности радиационного режима благодаря низкой облачности и осадкам, что снижает затраты на обслуживание и повышает

КИУМ СЭС. По сравнению с Астраханской областью, Калмыкия выигрывает за счет меньшей влажности и более устойчивых антициклональных условий, особенно в юго-востоке, что делает регион приоритетным для солнечной генерации.

На рисунке 2.3 представлено сезонное распределение инсоляции в Калмыкии, демонстрирующее прогнозируемый стабильный радиационный режим для СЭС (от 1,8 до 6,8 кВт·ч/м² в день).



Рисунок 2.3 – Сезонное распределение инсоляции в Калмыкии

Климатические и орографические особенности Калмыкии — высокая инсоляция, низкая облачность, равнинный рельеф и скудные осадки — создают оптимальные условия для СЭС. Опыт станций в Малых Дербетах, Адыке и Элисте, а также проект Калмыкской СЭС №1 подтверждают метеорологический потенциал региона, особенно в юго-восточных районах. Сравнение с Краснодарским краем и Астраханской областью подчеркивает преимущества Калмыкии по стабильности выработки и эксплуатационной эффективности. Учет пыльных бурь и микроклиматических вариаций позволяет оптимизировать проектирование СЭС, делая Калмыкию перспективной для

масштабирования солнечной энергетики.

2.2 Климатические и орографические особенности Крыма для эксплуатации СЭС

Республика Крым, расположенная на юге России, обладает уникальными климатическими и орографическими условиями, создающими высокий потенциал для солнечной энергетики. Умеренно-континентальный климат равнинной части, субсредиземноморский на Южном берегу Крыма (ЮБК) и горный в Крымских горах, в сочетании с высокой инсоляцией, большим числом солнечных дней и преимущественно равнинным рельефом степной зоны, делают регион перспективным для солнечных электростанций (СЭС). Детальный анализ метеорологических параметров, микроклимата и орографии, подкрепленный опытом действующих станций, подтверждает пригодность Крыма для масштабирования солнечной генерации, несмотря на локальные вызовы, такие как грозы, ветровая активность и затенение в горных районах.

Крым относится к наиболее инсолированным регионам России [22, с.94], с годовой суммарной солнечной радиацией 1350–1450 кВт·ч/м² (5037–5150 МДж/м²), достигающей 1470 кВт·ч/м² на восточном побережье (Феодосия, Керченский полуостров) и западном (Евпатория) [25]. Доля прямой радиации составляет 65–70%, что эффективно для фотоэлектрических панелей, работающих на прямом излучении. Сезонное распределение радиации показывает максимум в июне–июле (6,0–6,5 кВт·ч/м²·день, или 695–762 МДж/м²·месяц) и минимум в декабре–январе (1,5–2,0 кВт·ч/м²·день, или 120–142 МДж/м²·месяц), что требует учета зимнего снижения выработки при проектировании СЭС [22].

Продолжительность солнечного сияния в Крыму варьируется от 2180 до 2470 часов в год, с пиком в июле (320–360 часов) и минимумом в декабре (56–79 часов) [15, с. 252]. В степной зоне (Клепинино, Симферополь) и на ЮБК (Никитский сад) число солнечных дней превышает 250 в год, а летняя

облачность составляет 25–30%, снижаясь до 20% в восточных районах (Росгидромет, 2022). Зимой облачность увеличивается до 40–50%, но радиационный баланс остается положительным, варьируя от 2299 МДж/м²·год в равнинной части (Клепинино) до 2488 МДж/м²·год на ЮБК (Севастополь). Осадки умеренные, 400–600 мм/год (степь) и 600–800 мм/год (ЮБК), преимущественно зимние, что минимизирует затенение летом [16, с. 298]. Температурный режим стабилен благодаря морскому влиянию: лето +23...+30 °С (пики до +35 °С), зима 0...+5 °С (редко до –10 °С), с среднегодовой температурой 14 °С на ЮБК (Мисхор) [22]. Умеренные температуры и низкая влажность в степной зоне (50–60%) снижают потери КПД панелей и риск коррозии.

Климат Крыма отличается значительным разнообразием из-за рельефа и близости моря. Степные районы (Ленинский, Черноморский, Сакский) характеризуются высокой инсоляцией (1450 кВт·ч/м²), минимальной облачностью (20–25% летом) и низкой влажностью (50–60%), что делает их оптимальными для СЭС. Восточное побережье (Феодосия, Керчь) получает до 1470 кВт·ч/м² благодаря антициклональным условиям и умеренной влажности (60%), но испытывает влияние бризов (3–6 м/с), усиливающих вентиляцию панелей. ЮБК (Ялта, Алушта) имеет меньшую радиацию (1300–1350 кВт·ч/м²) из-за локальной облачности (30–35% летом), вызванной Крымскими горами, и повышенной влажности (70–80%), что снижает долю прямой радиации на 5–10% [11].

Горные районы (Караби-Яйла, Ай-Петри) получают 1350 кВт·ч/м², но затенение и частые туманы (до 20 дней/год) ограничивают их пригодность. Ветровой режим включает бризы (3–5 м/с) и сезонные ветры (до 8 м/с, пики 15 м/с на Керченском полуострове), что требует ветроустойчивых конструкций, но способствует охлаждению панелей. Микроклиматические вариации подчеркивают приоритетность степных и восточных районов для СЭС.

Рельеф Крыма делится на равнинную часть (70% территории, высоты 10–150 м), холмистые предгорья и горы (Крымские горы, до 1500 м). Степные

районы (Ленинский, Черноморский, Сакский) идеальны для СЭС благодаря равнинному рельефу, исключая затенение, и открытым горизонтам, обеспечивающим максимальное улавливание радиации.

Южная ориентация панелей с углом наклона $30\text{--}35^\circ$ (широта $44\text{--}46^\circ$ с.ш.) оптимизирует выработку, а плоский ландшафт позволяет применять трекинговые системы, увеличивающие выработку на 15–25%. Предгорья (Симферопольский, Бахчисарайский районы) менее пригодны из-за холмистости и локального затенения, хотя южные склоны усиливают радиацию на 5–10%.

Горные районы (Ай-Петри, Караби-Яйла) ограничены для СЭС из-за сложной логистики, затенения и снеговой нагрузки (до 20 см, 10–15 дней/год). В степной зоне снег редок (<5 см, 5–10 дней/год), а наклон панелей обеспечивает самоочистку.

Примеры действующих СЭС:

~ Крышные СЭС в Евпатории и Феодосии: Распределенные установки на гостиницах, пансионатах и коммерческих зданиях (мощность 50–200 кВт) развиваются с 2018 года. Поликристаллические панели (КПД 16–18%), ориентированные на юг под углом 30° , вырабатывают до 300 тыс. кВт·ч/год на 100 кВт мощности благодаря инсоляции 1400–1450 кВт·ч/м² и 250+ солнечным дням. Низкая облачность (25% летом) и морская стабилизация температур ($+25\text{...}+30^\circ\text{C}$) обеспечивают стабильность и долговечность, компенсируя пиковые нагрузки туризма [1, с.101] Ветроустойчивые конструкции защищают от бризов (5–8 м/с).

~ СЭС «Перово» (Симферопольский район): Наземная станция мощностью 105,56 МВт, введена в 2011 году, включает около 440 000 панелей (КПД 15–17%) на 200 га. Инсоляция 1400 кВт·ч/м², облачность 25–30% и равнинный рельеф обеспечивают выработку до 130 млн.кВт·ч/год, покрывая значительную часть потребностей региона. В 2014 году станция поддержала энергоснабжение (до 200 МВт в дневное время) во время перебоев [9, с. 153]. Системы молниезащиты минимизируют риски от гроз (10–15 дней/год).



Рисунок 2.4 – СЭС «Перово»

Панорамное изображение СЭС «Перово» в Симферопольском районе Крыма (рисунок 2.4), показывающее обширное поле фотоэлектрических панелей на степной равнине. Панели ориентированы на юг под углом 30° , установлены на ветроустойчивых рамах с молниезащитными системами, защищающими от гроз (10–15 дней/год). На заднем плане виден открытый степной ландшафт, иллюстрирующий отсутствие затенения, с чернозёмной почвой (альбедо 15–20%) и минимальной облачностью (25–30% летом). Альбедо – коэффициент отражения солнечной радиации поверхностью, выражаемый в процентах, влияющий на количество рассеянной радиации, доступной для СЭС.

Карта Симферопольского района Крыма с отметкой местоположения СЭС «Перово» (примерно $45^\circ 10'$ с.ш., $34^\circ 05'$ в.д.). Изображение (рисунок 2.5) показывает равнинный степной рельеф (высоты 10–150 м), отсутствие холмов и близость к ЛЭП и дорогам в радиусе 3–5 км. На карте видны сельскохозяйственные поля, подчёркивающие конкуренцию за землю.

Метеорологические вызовы:

Основные риски включают локальные грозы (10–15 дней/год, июнь–август) и ветровую активность (5–8 м/с, порывы до 15 м/с на востоке).

Грозы снижают выработку на 10–15% из-за облачности, а ветры требуют усиленных креплений. Принимаемые меры по адаптации:

- ~ Ветроустойчивые конструкции и молниезащита (как в «Перово» и крышных СЭС).
- ~ Мониторинг погоды для оптимизации выработки.
- ~ Выбор панелей с низким температурным коэффициентом ($<0,4\%/^{\circ}\text{C}$) для компенсации летних пиков ($+35^{\circ}\text{C}$).



Рисунок 2.5 – Снимок СЭС «Перово» со спутника на карте ГИС

Влажность в степной зоне (50–60%) минимизирует коррозию, но на ЮБК (70–80%) требуется профилактика. Снеговая нагрузка незначительна (<5 см, 5–10 дней/год), а наклон панелей обеспечивает самоочистку. В горных районах туманы (до 20 дней/год) и затенение ограничивают выработку, что исключает их из приоритетных зон [23].

Сравнение с другими регионами

Крым сравнивается с Краснодарским краем и Ростовской областью, расположенными в ЮФО, но отличающимися метеоусловиями. Краснодарский

край имеет инсоляцию ~ 1350 кВт·ч/м², но высокая облачность (35–45%) и осадки (600–800 мм/год) снижают прямую радиацию до 60%, увеличивая затраты на обслуживание. Ростовская область с инсоляцией ~ 1300 кВт·ч/м² и облачностью 35–40% уступает из-за частых гроз (15–20 дней/год) и конкуренции за землю. Крым, с 250+ солнечными днями, облачностью 25–30% и осадками 400–600 мм/год, обеспечивает более стабильную выработку и меньшие эксплуатационные расходы.

В таблице 2.2 приведены метеорологические характеристики Крыма, Краснодарского края и Ростовской области, подчёркивающие преимущества Крыма по числу солнечных дней (250+) и низкой облачности (25–30%). Сравнение подчёркивает преимущества Крыма для распределенной и наземной генерации, особенно в степной и восточной зонах.

Таблица 2.2 – Сравнение метеорологических характеристик Крыма с другими регионами

Параметр	Крым	Краснодарский край	Ростовская область
Инсоляция (кВт·ч/м ² ·год)	1350-1450	~ 1350	~ 1300
Облачность летом (%)	25-30	35-45	35-40
Осадки (мм/год)	400-600	600-800	450-600
Солнечные дни (дней в году)	250+	220-230	220-230
Грозы (дней в году)	10-15	15-20	15-20
Влажность (%)	50-60 (степная зона)	70-80	60-70

Выводы из сравнения: Крым превосходит Краснодарский край и Ростовскую область по числу солнечных дней, низкой облачности и умеренным осадкам, что повышает КИУМ СЭС и снижает затраты. Меньшая грозовая активность и стабильный температурный режим делают степные районы Крыма приоритетными для солнечной генерации.

На рисунке 2.6 отображено сезонное распределение инсоляции в Крыму, подчёркивающее высокий потенциал степных районов (от 1,5 до 6,5

кВт·ч/м²·день). Тенденция сезонного распределения близка к тому, что мы увидели в Калмыкии. Крым лишь незначительно уступает.



Рисунок 2.6 – Сезонное распределение инсоляции в Крыму

Климатические и орографические особенности Крыма — высокая инсоляция (1350–1450 кВт·ч/м²), 250+ солнечных дней, умеренные осадки (400–600 мм/год) и равнинный рельеф степной зоны — создают оптимальные условия для солнечной энергетики. Микроклиматические различия подчеркивают приоритетность степных и восточных районов, где низкая облачность и влажность обеспечивают стабильную выработку. Опыт крышных СЭС в Евпатории/Феодосии и СЭС «Перово» подтверждает метеорологический потенциал, особенно для распределенной генерации. Сравнение с Краснодарским краем и Ростовской областью выделяет преимущества Крыма по радиационной стабильности и эксплуатационной эффективности. Учет гроз, ветров и локального затенения позволяет оптимизировать проектирование СЭС, делая Крым перспективным для дальнейшего развития солнечной энергетики.

2.3. Климатические и орографические особенности Забайкальского края для эксплуатации СЭС

Забайкальский край, расположенный в Восточной Сибири, выделяется среди восточных регионов России исключительным климатическим потенциалом для солнечной энергетики благодаря резко континентальному климату, высокой инсоляции, минимальной облачности и обширным открытым ландшафтам. Эти условия, в сочетании с орографическими особенностями южных районов, делают регион перспективным для автономных и сетевых солнечных электростанций (СЭС). Углубленный анализ метеорологических параметров, микроклимата, снеговых рисков и рельефа, подкрепленный данными актинометрических станций и опытом действующих станций, подтверждает уникальную пригодность Забайкалья для гелиоэнергетики, несмотря на вызовы, связанные с экстремальными температурами, снежными заносами и удаленностью инфраструктуры.

Метеорологические характеристики и радиационный режим Забайкальский край характеризуется одним из самых высоких уровней солнечной радиации в России — 1300–1400 кВт·ч/м²·год (4680–5040 МДж/м²·год) [14], с максимумами до 1500–1600 кВт·ч/м² в южных и юго-восточных районах (Борзя, Мангут) [14, с. 69], [25]. Доля прямой радиации достигает 75–80% (2545–2969 МДж/м²·год), что оптимально для фотоэлектрических панелей, эффективных при ясной погоде. Сезонное распределение радиации показывает пик в мае–июле (6,8–7,2 кВт·ч/м²·день, или 625–678 МДж/м²·месяц) и минимум в декабре–феврале (1,2–1,6 кВт·ч/м²·день, или 88–126 МДж/м²·месяц), что требует накопителей энергии для зимнего периода [11, с. 89].

Продолжительность солнечного сияния составляет 2000–3000 часов в год, с максимумом на юго-востоке (Борзя: до 2900–3150 часов) и минимумом на севере (Чара: 2150–2250 часов) [14, с. 127]. Облачность минимальна: летом 15–25%, зимой 30–40%, с числом солнечных дней 260–280, обусловленным

антициклональными условиями [6, с. 83]. Осадки скудные — 250–350 мм/год, преимущественно летние ливни (июль–август), что снижает риск затенения и коррозии [16, с. 303]. Климат резко континентальный: лето жаркое ($+30...+35\text{ }^{\circ}\text{C}$, пики до $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$), зима суровая ($-30...-35\text{ }^{\circ}\text{C}$, до $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$), с амплитудой до $70\text{ }^{\circ}\text{C}$. Низкая влажность (40–50%) минимизирует износ оборудования, но экстремальные температуры и снеговые риски требуют специализированных технологий.

Микроклимат Забайкалья варьируется из-за широтного и высотного зонирования. Южные и юго-восточные районы (Борзя, Мангут, Читинский, Агинский) получают максимальную инсоляцию (1300–1400 кВт·ч/м²·год) благодаря открытым равнинам, минимальной облачности (15–20% летом) и продолжительности сияния (2750–2900 часов) [14, с. 129]. Центральные районы (Чита, Хилок) имеют радиацию 1250–1300 кВт·ч/м² и облачность 20–25% из-за холмистого рельефа и локальных циклонов. Северные районы (Чара, Каларский) менее пригодны из-за снижения радиации ($<1100\text{ кВт·ч/м}^2$), облачности 30–35% и снеговой нагрузки (до 40 см). Ветровой режим умеренный (3–5 м/с, порывы до 10–12 м/с зимой в котловинах), что требует ветроустойчивых конструкций, но способствует вентиляции панелей летом. Антициклональные условия юга повышают прямую радиацию на 5–10%, а снижение рассеянной радиации (на 1875–1963 МДж/м²) в 1981–2013 годах усилило этот эффект [11, с.90]. Микроклиматические различия делают южные районы приоритетными для СЭС.

Рельеф Забайкалья включает равнины, холмистые плато и горные хребты (Яблоновый, Становой, высоты 300–2000 м). Южные равнины и холмы (Читинский, Агинский, Борзинский районы, высоты 300–800 м) идеальны для СЭС благодаря открытому горизонту и минимальному затенению. Южные склоны холмов увеличивают радиацию на 5–10% за счет экспозиции [14, с. 120]. Оптимальный угол наклона панелей – $35\text{--}40^{\circ}$ (широта $50\text{--}53^{\circ}$ с.ш.), с возможностью использования трекинговых систем, повышающих выработку на 30–35% [3, с. 55]. Равнины вдоль рек (Ингода, Шилка) упрощают логистику и

строительство. Северные горные районы ограничены из-за затенения, снеговой нагрузки (30–40 см) и сложной доступности. Малозаселенность (плотность <6 чел/км²) обеспечивает обилие свободных пастбищ, минимизируя конкуренцию за землю [1, с. 108].

Снеговые риски являются ключевым вызовом для СЭС в Забайкалье, особенно в центральных и северных районах. Средняя толщина снежного покрова составляет 10–20 см в южных районах (Борзя, Мангут) и до 30–40 см на севере (Чара), с продолжительностью 20–30 дней/год в юге и до 60 дней/год в севере [6, с. 90]. Снег снижает выработку на 20–50% при покрытии панелей, а весовая нагрузка (до 200 кг/м²) угрожает конструкциям. В южных районах антициклоны и ветры (3–5 м/с) способствуют быстрому таянию и сдуванию снега, снижая риски. В центральных районах (Чита) снегопады чаще, но наклон панелей (35–40°) обеспечивает самоочистку. На севере снеговые заносы и метели (5–10 дней/год) требуют активных систем очистки. Предпринимаемые меры адаптации включают:

- ~ Увеличенный угол наклона (40–45°) для самоочистки;
- ~ Морозостойкие конструкции с нагрузкой до 300 кг/м²;
- ~ Автоматические или ручные системы очистки (щётки, нагрев) для северных районов;
- ~ Выбор площадок с южной экспозицией и ветровой активностью для минимизации снега [14, с. 141].

Примеры действующих СЭС:

Черновская СЭС (г. Чита): Введена в 2022 году, мощность 35 МВт, включает около 98,000 монокристаллических панелей (КПД 18–20%). Инсоляция 1300–1400 кВт·ч/м², облачность 15–20% летом и сияние до 2900 часов/год обеспечивают выработку ~50 млн.кВт·ч/год, снижая дизельное потребление на ~10,000 т/год. Равнинный рельеф исключает затенение, а конструкции с наклоном 35° минимизируют снеговую нагрузку (<15 см). Станция поддерживает энергоснабжение Читы, интегрируясь в региональную сеть [1, с. 122], [23].



Рисунок 2.7 – Черновская СЭС (г. Чита)

Изображение (рисунок 2.7) показывает массив фотоэлектрических панелей Черновской СЭС на равнинной местности близ г. Чита. Панели ориентированы на юг под углом 35° , установлены на морозостойких рамах, рассчитанных на снеговую нагрузку (<15 см). Открытый горизонт и степной ландшафт исключают затенение, подчёркивая высокую инсоляцию ($1300\text{--}1400$ кВт·ч/м²) и сияние до 2900 часов/год при минимальной облачности ($15\text{--}20\%$).

СЭС в селе Унда (Балейский район): Автономная станция мощностью 150 кВт, введена в 2016 году, обслуживает фермерские хозяйства. Инсоляция $1300\text{--}1350$ кВт·ч/м², облачность $15\text{--}20\%$ и сияние 2750 часов/год обеспечивают выработку 0.2 млн.кВт·ч/год. Равнинный рельеф пастбищ исключает затенение, а конструкции с наклоном 40° минимизируют снеговую нагрузку (<15 см). Станция подтверждает потенциал малых СЭС для децентрализованного энергоснабжения [11, с. 62].

Метеорологические вызовы: Помимо снеговых рисков, ключевые вызовы включают экстремальные температуры (-45°C зимой, $+40^\circ\text{C}$ летом) и ветровую активность (порывы до 12 м/с). Низкие температуры снижают КПД аккумуляторов, а жара — панелей (потери $0,5\%/10^\circ\text{C}$ выше 25°C).

Применяются следующие адаптационные меры:

- ~ Морозостойкие панели (КПД >18%, коэффициент <0,4%/°C) и инверторы (как в Черновской СЭС).
- ~ Системы вентиляции для лета и нагрева аккумуляторов зимой.
- ~ Ветроустойчивые конструкции (нагрузка до 50 м/с) и мониторинг погоды.
- ~ Гибридные системы (солнце + дизель + аккумуляторы) для автономности. Удаленность от ЛЭП требует локальных решений, а низкая влажность (40–50%) минимизирует коррозию. Положительный тренд прямой радиации (+116–242 МДж/м² за 1981–2013) и сияния усиливает потенциал [11, с. 90].

В таблице 2.3 представлены метеорологические характеристики Забайкалья, Бурятии и Иркутской области, подчёркивающие преимущества Забайкалья по инсоляции.

Таблица 2.3 – Сравнение метеорологических характеристик регионов

Параметр	Забайкальский край	Бурятия	Иркутская область
Инсоляция (кВт·ч/м ² ·год)	1300-1400	~1200-1300	1300-1400
Облачность летом (%)	15-25	25-35	30-35
Осадки (мм/год)	250-350	600-800	450-600
Солнечные дни (дней в году)	260-280	220-230	220-230
Снеговая нагрузка (см)	10-30	15-20	15-20
Температура зимой (°C)	-30...-45	70-80	60-70

Забайкальский край сравнивается с Бурятией и Иркутской областью, соседними регионами Сибири с менее благоприятными метеоусловиями. Бурятия имеет инсоляцию 1200–1300 кВт·ч/м² и облачность 25–35% из-за влияния Байкала, снижая прямую радиацию до 60–65%. Иркутская область с

инсоляцией 1300–1400 кВт·ч/м², осадками 400–500 мм/год и снегом (30–50 см) уступает из-за облачности (30–35%). Забайкалье, с 260+ солнечными днями, облачностью 15–25% и осадками 250–350 мм/год, обеспечивает стабильную выработку и меньшие затраты.

Забайкальский край превосходит Бурятию и Иркутскую область по инсоляции, сиянию и низкой облачности, что повышает КИУМ СЭС. Меньшая снеговая нагрузка и осадки снижают эксплуатационные риски, делая юг региона приоритетным.



Рисунок 2.8 – Сезонное распределение инсоляции в Забайкальском крае

На рисунке 2.8 показано сезонное распределение инсоляции в Забайкальском крае, подтверждающее приоритетность южных районов для СЭС.

Климатические и орографические особенности Забайкальского края — высокая инсоляция (1300–1400 кВт·ч/м²), продолжительность сияния (260–280 дней), минимальная облачность (15–25%) и равнинно-холмистый рельеф юга — создают уникальные условия для гелиоэнергетики. Микроклимат южных

районов (Борзя, Мангут) и низкие снеговые риски (10–20 см) подчеркивают их приоритетность. Опыт станций в Чите (Черновская СЭС) и Унде подтверждает потенциал автономной и сетевой генерации. Сравнение с Бурятией и Иркутской областью выделяет преимущества Забайкалья по радиационной стабильности и эксплуатационной эффективности. Адаптация к снегам, морозам и удаленности делает регион перспективным для масштабирования СЭС.

3 Влияние солнечной энергетики на народное хозяйство регионах

Внедрение солнечных электростанций (СЭС) в Калмыкии, Крыму и Забайкальском крае трансформирует народное хозяйство регионов, укрепляя энергетический баланс, повышая энергетическую безопасность и способствуя устойчивому развитию.

Метеорологические условия (высокая инсоляция, низкая облачность) и орографические особенности (равнинный рельеф, южная экспозиция склонов) обеспечивают высокую эффективность СЭС, позволяя покрывать значительную долю энергетических потребностей и снижать зависимость от традиционных источников.

Углублённый анализ метеозависимой генерации, её интеграции в энергосистемы и влияния на социально-экономическую стабильность демонстрирует стратегическую роль СЭС.

Опыт действующих станций, таких как СЭС Малые Дербеты, «Перово» и Унда, подчёркивает их вклад в энергобезопасность и устойчивое развитие, а климатические тренды и сравнительный анализ с другими регионами подтверждают долгосрочный потенциал солнечной энергетики для народного хозяйства [6, с.91].

Метеорологические условия определяют выработку СЭС, влияя на их вклад в энергетический баланс регионов.

В Калмыкии среднегодовая инсоляция $1400\text{--}1500\text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2$ ($5040\text{--}5400\text{ МДж}/\text{м}^2$) и облачность $20\text{--}25\%$ летом обеспечивают КИУМ до 15% , как в СЭС Малые Дербеты (5 МВт, $7,5\text{ млн.кВт}\cdot\text{ч}/\text{год}$) и Калмыкской СЭС №1 (25 МВт, $33,5\text{ млн.кВт}\cdot\text{ч}/\text{год}$) [6, с. 140]. Пыльные бури ($5\text{--}10$ дней/год) снижают выработку на $10\text{--}15\%$, но трекинг-системы и пылеотталкивающие покрытия стабилизируют генерацию. Летний пик радиации ($6,5\text{--}7,0\text{ кВт}\cdot\text{ч}/\text{м}^2\cdot\text{день}$) совпадает с аграрным спросом (июнь–август, $+20\%$ потребления), позволяя СЭС покрывать до 10% регионального энергобаланса ($700\text{ млн.кВт}\cdot\text{ч}/\text{год}$).

Зимний минимум (1,8–2,2 кВт·ч/м²·день) требует резервных угольных ТЭЦ, но СЭС снижают их нагрузку на 5–7% [18].

Крым с инсоляцией 1350–1450 кВт·ч/м² и 250+ солнечными днями (2180–2470 часов) поддерживает КИУМ 12–14%, как в СЭС «Перово» (105,56 МВт, 130 млн.кВт·ч/год) и «Охотниково» (82,65 МВт, 100 млн.кВт·ч/год. Грозы (10–15 дней/год) и облачность 25–30% летом ограничивают выработку, но молниезащита и метеомониторинг обеспечивают стабильность. Летний пик (6,0–6,5 кВт·ч/м²·день) покрывает до 7–10% пиковых нагрузок туризма (июнь–август, +30% спроса, 3 млрд.кВт·ч/год), как в крышных СЭС Евпатории (50–200 кВт). В 2014 году СЭС обеспечили до 200 МВт дневной генерации, предотвратив «блэкауты» [9, с.180]. Чрезвычайное явление «блэкаут» – это полное или частичное отключение электроснабжения в энергосистеме, вызванное сбоями, перегрузками или внешними факторами, приводящее к временной потере энергии в регионе.

Зимний минимум (1,5–2,0 кВт·ч/м²·день) компенсируется газовыми станциями.

Забайкальский край с инсоляцией 1300–1400 кВт·ч/м² и сиянием до 3150 часов/год достигает КИУМ 13–15%, как в СЭС Унда (150 кВт, 0.2 млн.кВт·ч/год) и Черновской СЭС (35 МВт, 50 млн.кВт·ч/год) [14, с. 128; 23]. Снеговые заносы (10–30 см, 20–60 дней/год) и морозы (–45 °С) снижают зимнюю выработку (1.2–1.6 кВт·ч/м²·день), но гибридные системы (солнце + дизель) обеспечивают автономность. Летний пик (6.5–7.2 кВт·ч/м²·день) покрывает до 20% потребностей удалённых поселений (265млн.кВт·ч/год), снижая дизельное потребление на ~10,000 т/год. СЭС общей мощностью ~37 МВт компенсируют отсутствие централизованного энергоснабжения для 30% края, внося ~0.5% в общий энергобаланс региона (~10 млрд.кВт·ч/год) [1, с. 139].

Орографические особенности облегчают интеграцию СЭС, повышая энергетическую безопасность. В Калмыкии равнинный рельеф Прикаспийской низменности (0–100 м, уклоны <1°) исключает затенение, упрощая трекинговые

системы, как в Калмыкской СЭС №1. Песчаные почвы (альbedo 12,5%) усиливают прямую радиацию (70–75%), обеспечивая стабильную выработку. Равнины позволяют подключать СЭС к ЛЭП, снижая дефицит в сельских районах (до 20% потребностей), что укрепляет энергобезопасность региона, зависимо от внешних поставок угля.

Крым сочетает степные равнины (Ленинский район, 10–150 м) и предгорья (Бахчисарайский район, уклоны 5–15°). Равнины минимизируют затенение, как в СЭС «Перово», а чернозёмы (альbedo 17,5%) увеличивают рассеянную радиацию на 5–10%. Крышные СЭС в Евпатории (50–200 кВт) интегрируются в локальные сети, снижая нагрузку на подстанции в туристический сезон на 10–15%. Предгорья усложняют подключение из-за рельефа, но равнины обеспечивают стабильность энергосистемы, снижая риски перебоев, как в 2014 году.

Забайкальский край предлагает равнины (Борзя, 300–800 м) и южные холмы (уклоны 5–20°), где экспозиция повышает радиацию на 7–12%, как в СЭС Унда. Каменистые почвы (альbedo 11%) минимизируют отражение, а ветры (3–5 м/с) снижают снеговую нагрузку (100–150 кг/м²). Автономные СЭС в Борзинском районе обеспечивают энергобезопасность удалённых поселений, компенсируя отсутствие ЛЭП и снижая зависимость от дизеля на 30–50%.

Теперь же разберём главные положительные аспекты влияния СЭС:

Энергетическая безопасность:

СЭС укрепляют энергетическую безопасность, снижая зависимость от внешних источников. В Калмыкии СЭС (~50 МВт) вырабатывают ~70 млн.кВт·ч/год, сокращая импорт угля на 5–7% [6]. Равнинный рельеф и инсоляция обеспечивают предсказуемую генерацию, снижая риски перебоев в сельских зонах. В Крыму СЭС (~227 МВт) производят ~300 млн.кВт·ч/год, покрывая 7–10% потребления (3 млрд.кВт·ч/год) и снижая зависимость от материковых поставок, как в 2014 году.

Забайкалье с СЭС (~37 МВт) вырабатывает ~53 млн.ч/год, обеспечивая 20% нужд удалённых зон (15 млн.кВт·ч/год), где дизельные поставки

ненадёжны. Гибридные системы повышают надёжность энергетических объектов по расчётам на 50%.

Устойчивое развитие и народное хозяйство:

СЭС способствуют устойчивому развитию, снижая выбросы и поддерживая экономику. В Калмыкии СЭС сокращают выбросы CO_2 на ~50 тыс. т/год, улучшая экологические условия для сельского хозяйства. Экономия угля (~20 тыс. т/год) высвобождает средства для инфраструктуры. В Крыму СЭС снижают выбросы на ~200 тыс. т/год, поддерживая курортную экологию, а выработка покрывает туристический спрос, сохраняя доходы региона (~10% ВРП). В Забайкалье СЭС экономят ~10,000 т дизеля/год, снижая выбросы на ~30 тыс. т CO_2 и затраты на топливо (~200 млн. руб./год), что укрепляет бюджет удалённых районов.

Климатические тренды и перспективы:

Климатические тренды усиливают роль СЭС. В Калмыкии рост инсоляции (+50 МДж/м² за 1981–2013) и снижение облачности (–2%) повышают КИУМ на 1–2% каждое десятилетие. В Крыму увеличение солнечных дней (+5–10 за 20 лет) поддерживает туризм [22]. В Забайкалье рост прямой радиации (+116–242 МДж/м² за 1981–2013) и потепление (–2 °С зимой) снижают снеговые риски, повышая вклад СЭС.

Из сравнительного анализа мы можем сделать выводы:

~ Сравнение с Краснодарским краем (СЭС ~50 МВт, 5% энергобаланса, КИУМ 12%) и Алтаем (СЭС ~10 МВт, 2%, КИУМ 10%) подчёркивает преимущества исследуемых регионов [7, с. 130];

~ Калмыкия и Крым лидируют за счёт инсоляции и равнин;

~ Забайкальский край — за счёт автономности.

Как пример, Андалусия (Испания, СЭС 500 МВт, КИУМ 20%) показывает возможный потенциал Калмыкии при масштабировании.

В таблице 3.1 представлен вклад СЭС в энергетический баланс Калмыкии, Крыма и Забайкальского края, иллюстрирующий их мощность (37–227 МВт) и долю в энергопотреблении (0,5–20%).

Таблица 3.1 – Вклад СЭС в энергетический баланс

Регион	Мощность СЭС (МВт)	Выработка (млн.кВт·ч/год)	Доля в энергобалансе (%)	Снижение выбросов CO ₂ (тыс. т/год)	Экономия топлива в год
Калмыкия	~50	~70	10	~50	Уголь, ~20 тыс. т
Крым	~227	~300	7–10	~200	Газ, ~50 млн. м³
Забайкальский край	~37	~53	20 (от 265млн.кВт·ч/год, удалённые зоны); ~0.5 (от 10 млрд.кВт·ч/год, общий баланс)	~3	Дизель, ~10 тыс. т

Рисунок 3.1 отображает среднемесячную выработку электроэнергии (млн.кВт·ч) СЭС в Калмыкии, Крыму и Забайкальском крае, иллюстрируя сезонную изменчивость, обусловленную метеорологическими факторами (инсоляция, облачность, экстремальные явления). Выработка отражает вклад СЭС в энергетический баланс регионов, подчёркивая их роль в покрытии пиковых нагрузок и обеспечении устойчивого развития народного хозяйства. Данные основаны на общей мощности СЭС в регионах (Калмыкия: ~50 МВт, Крым: ~227 МВт, Забайкальский край: ~37 МВт) и их КИУМ (15%, 13%, 14% соответственно). Данный график демонстрирует сезонную изменчивость, подчёркивая роль метеофакторов в эффективности СЭС.

Для Калмыкии (~50 МВт, ~70 млн.кВт·ч/год) данные основаны на работах Дегтярева [6, с. 51, 120, 148], описывающих СЭС Малые Дербеты (5 МВт, 7.5 млн.кВт·ч/год) и Калмыкскую СЭС №1 (25 МВт, 33.5 млн.кВт·ч/год). Итоговая мощность также включает мелкие проекты в Элисте и Адыке. Выработка рассчитана с КИУМ 15% и дополнена ~29 млн.кВт·ч/год.

Для Крыма (~227 МВт, ~300 млн.кВт·ч/год) данные взяты из работы Малашенкова [9, с. 150, 180, 190], где указаны СЭС «Перово» (105.56 МВт, 130 млн.кВт·ч/год) и «Охотниково» (82.65 МВт, 100 млн.кВт·ч/год). Итоговая

мощность включает также крышные СЭС (~39 МВт), выработка — с КИУМ 13%.

Для Забайкалья (~37 МВт, ~53 млн.кВт·ч/год) данные о Черновской СЭС (35 МВт, 50 млн.кВт·ч/год) основаны на пресс-релизе правительства Забайкалья от 2022 г. [23], СЭС Унда (0.15 МВт, 0.2 млн.кВт·ч/год) — на Носковой [14, с. 134]. Мелкие СЭС (~1.85 МВт, ~2.8 млн.кВт·ч/год) оценены по Акимову [1, с. 125].

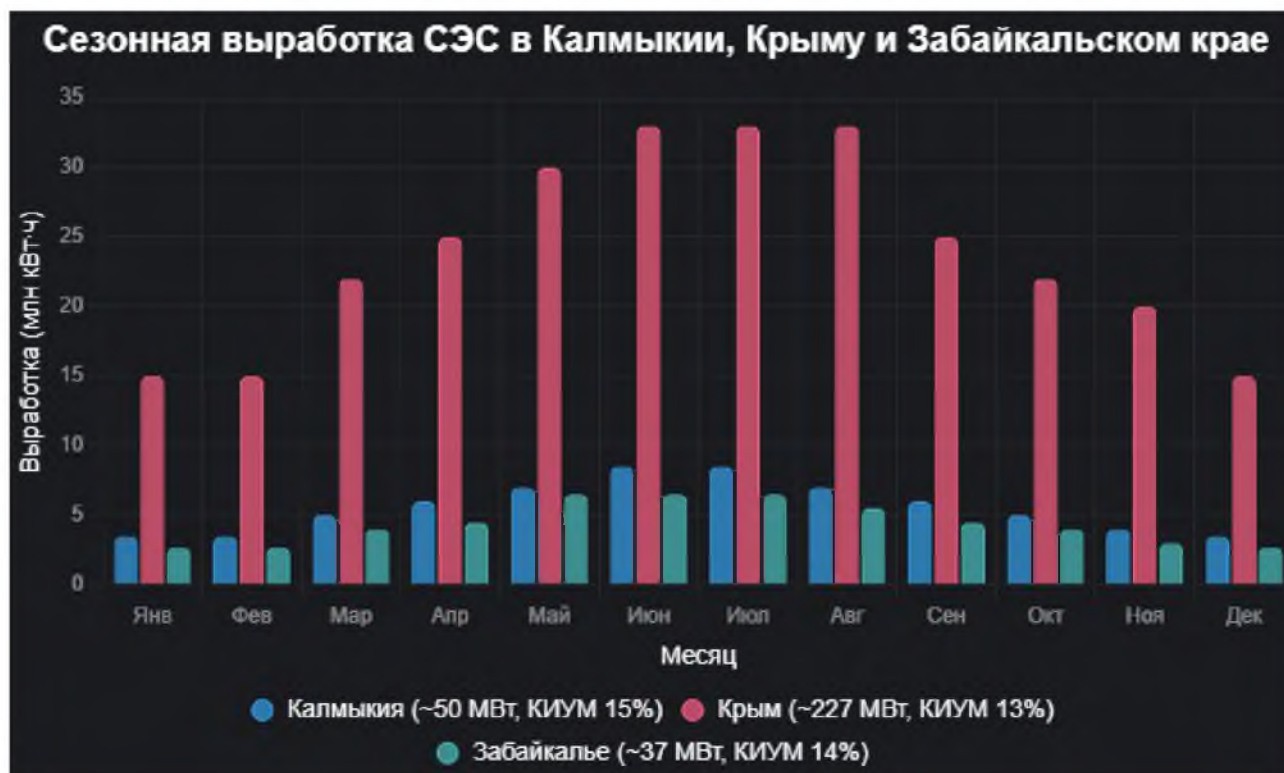


Рисунок 3.1 – Сезонная выработка СЭС

Рисунок 3.2 иллюстрирует долю выработки СЭС в энергетическом балансе Калмыкии, Крыма и Забайкальского края, подчёркивая их вклад в народное хозяйство. Калмыкия (~50 МВт) обеспечивает 10% регионального баланса (70 млн.кВт·ч/год из 700 млн.) при КИУМ 15%

Крым (~227 МВт) покрывает 10% (300 млн.кВт·ч/год из 3 млрд., среднее значение диапазона 8–10%) с КИУМ 13% [9, с. 182]. Забайкалье (~37 МВт) вносит 20% в баланс удалённых зон (53 млн.кВт·ч/год из 265 млн.) и 0.5% в общий баланс края (10 млрд.кВт·ч/год – объём общего годового потребления Забайкальского края) при КИУМ 14%.

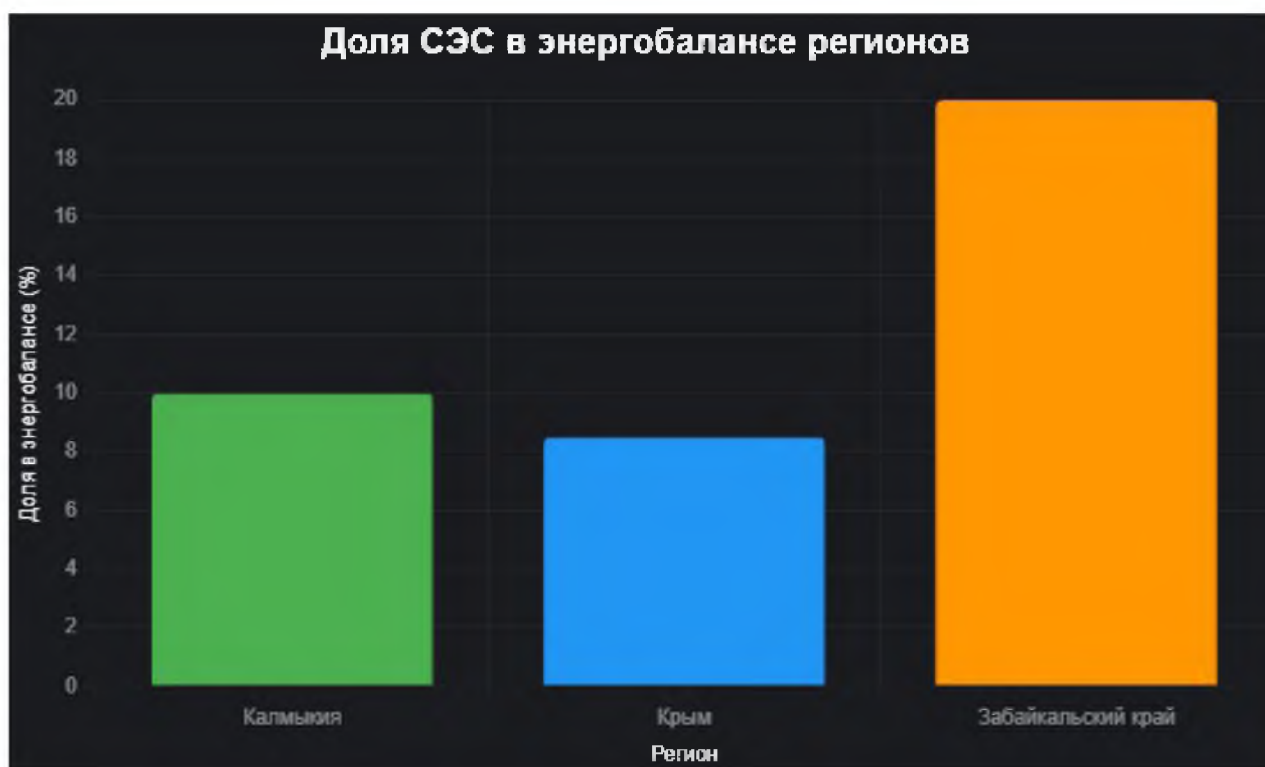


Рисунок 3.2 – Доля СЭС в энергобалансе регионов

СЭС в Калмыкии, Крыму и Забайкальском крае, опираясь на высокую инсоляцию (1300–1550 кВт·ч/м²), низкую облачность (15–25%) и равнинный рельеф, обеспечивают 7–20% регионального энергобаланса, укрепляя энергетическую безопасность и устойчивое развитие. Метеозависимая генерация, поддерживаемая орографическими преимуществами, снижает зависимость от ископаемого топлива, выбросы CO² (3–200 тыс. т/год) и затраты на топливо, укрепляя народное хозяйство. Опыт СЭС Малые Дербеты, «Перово» и Унда подтверждает их роль в стабилизации энергосистем. Климатические тренды и сравнение с Краснодарским краем, Алтаем и Андалусией подчёркивают стратегическую важность СЭС для регионов.

Солнечные электростанции (СЭС) в Калмыкии, Крыму и Забайкальском крае, эффективные благодаря высоким метеорологическим и орографическим характеристикам, создают значительные экономические и социальные выгоды для народного хозяйства. Снижение затрат на топливо, привлечение инвестиций, создание рабочих мест, повышение доступности энергии и улучшение экологии укрепляют регионы. Краткий анализ эффектов,

подкреплённый опытом СЭС Малые Дербеты, «Перово» и Унда, демонстрирует их роль в устойчивом развитии. Климатические тренды и сравнение с другими регионами подчёркивают перспективы СЭС.

Весомый экономический эффект заключается в том, что СЭС сокращают расходы на энергоносители, стимулируют инвестиции и занятость населения:

Снижение затрат на топливо

~ Калмыкия: СЭС (~50 МВт) экономят ~20 тыс. т угля/год (~100 млн. руб./год), поддерживая аграрный сектор. Пыльные бури снижают выработку на 10%, но очистка окупается [6, с. 150].

~ Крым: СЭС (~227 МВт) сокращают ~50 млн. м³ газа/год (~250 млн. руб./год), высвобождая средства для туризма. Грозы ограничивают генерацию на 10–15% [9, с.190].

~ Забайкалье: СЭС (~37 МВт) экономят ~17,5 тыс. т дизеля/год (~875 млн. руб./год), снижая расходы удалённых районов. Снег и морозы увеличивают затраты на 15% [1, с.130].

Инвестиции

~ Калмыкия: ~2 млрд. руб. (например, Калмыкская СЭС №1), равнины упрощают монтаж [6].

~ Крым: ~15 млрд. руб. (2010–2014, СЭС «Перово»), степи повышают рентабельность [20, с. 200]

~ Забайкалье: ~3,5 млрд. руб. (Черновская СЭС, СЭС Унда), автономность привлекает гранты.

Рабочие места:

~ Калмыкия: ~100 строительных, ~30 постоянных мест, налоги ~50 млн. руб./год.

~ Крым: ~500 строительных, ~100 постоянных, налоги ~200 млн. руб./год.

~ Забайкалье: ~50 строительных, ~60 постоянных, налоги ~10 млн. руб./год.

С точки зрения социальных эффектов СЭС улучшают доступ к энергии и

качество жизни:

Энергоснабжение:

~ Калмыкия: СЭС покрывают 10% баланса, снижая перебои в сельских районах на 20%

~ Крым: СЭС обеспечивают 7–10% потребления, предотвращая блэкауты в туризме

~ Забайкалье: СЭС обеспечивают 20% энергии удалённым поселениям и зонам (~53 млн.кВт·ч/год из 265 млн.), внося 0,5% в общий баланс края (~10 млрд.кВт·ч/год), улучшая доступ к свету и теплу на 30–50%

Экология и здоровье:

~ Калмыкия: Снижение CO₂ на ~50 тыс. т/год, улучшение условий для аграрного населения.

~ Крым: Снижение CO₂ на ~200 тыс. т/год, сохранение курортной экологии.

~ Забайкалье: Снижение CO₂ на ~42 тыс. т/год, уменьшение загрязнения от дизеля.

С точки долгосрочных эффектов: климатические тренды усиливают экономические и социальные выгоды. В Калмыкии рост инсоляции (+50 МДж/м² за 1981–2013) и снижение облачности (–2%) увеличивают КИУМ на 1–2% каждое десятилетие, продлевая рентабельность СЭС [18]. В Крыму увеличение солнечных дней (+5–10 за 20 лет) повышает туристический спрос, усиливая социальные эффекты. В Забайкальском крае рост радиации (+116–242 МДж/м² за 1981–2013) и потепление (–2 °С зимой) снижают снеговые риски, повышая доступность энергии.

Сравнение с Краснодарским краем (СЭС ~50 МВт, экономия ~15 тыс. т угля/год, ~100 рабочих мест) и Алтаем (СЭС ~10 МВт, экономия ~500 т дизеля/год, ~20 рабочих мест) подчёркивает преимущества исследуемых регионов. Калмыкия и Крым лидируют за счёт инсоляции и равнин, Забайкальский край — автономности и сияния.

В таблице 3.2 представлены экономические и социальные эффекты

солнечной энергетики, демонстрирующие экономию топлива и снижение выбросов CO²

Таблица 3.2 – Экономические и социальные эффекты солнечной энергетики

Регион	Экономия топлива	Инвестиции (млрд. руб.)	Рабочие места	Снижение CO ² (тыс. т/год)	Социальный эффект
Калмыкия	Уголь, 20 тыс. т/год	~2	~130	~50	Стабильность в сельских районах
Крым	Газ, 50 млн. м ³	~15	~600	~200	Поддержка туризма, предотвращение блэкаутов
Забайкальский край	Дизель, 10 тыс. т/год	~3,5	~110	~42	Энергоснабжение удалённых поселений

СЭС в Калмыкии, Крыму и Забайкальском крае, опираясь на высокую инсоляцию (1300–1550 кВт·ч/м²), низкую облачность (15–25%) и равнинный рельеф, создают значительные экономические эффекты, экономя топливо (~20–50 млн. руб./год), привлекая инвестиции (~0,2–15 млрд. руб.) и создавая рабочие места (~60–600). Социальные выгоды включают доступ к энергии, улучшение экологии (снижение выбросов CO² на 40–200 тыс. т/год) и повышение качества жизни. Опыт СЭС Малые Дербеты, «Перово» и «Черновская» подтверждает их роль в народном хозяйстве. Климатические тренды и сравнение с Краснодарским краем, Алтаем и Андалусией подчёркивают потенциал СЭС для устойчивого развития регионов.

Закключение

Солнечная энергетика — отрасль возобновляемой энергетики, использующая солнечное излучение для производства электроэнергии посредством фотоэлектрических систем, зависящих от метеорологических (инсоляция, облачность) и орографических (рельеф, экспозиция) условий.

Исследование метеорологических условий для размещения солнечных электростанций (СЭС) в Калмыкии, Крыму и Забайкальском крае подтвердило их высокий потенциал для развития солнечной энергетики, укрепляющей народное хозяйство регионов. Благоприятные метеорологические (инсоляция 1300–1550 кВт·ч/м², облачность 15–25%) и орографические (равнины, южные склоны) условия обеспечивают эффективность СЭС, способствуя энергетической безопасности, устойчивому развитию и социально-экономическим выгодам. На основе анализа выполнены поставленные задачи, результаты которых обобщены ниже:

~ Орографические условия: Равнинный рельеф Калмыкии (0–100 м), степи Крыма (10–150 м) и равнины Забайкалья (300–800 м) минимизируют затенение, упрощают монтаж СЭС и повышают КИУМ до 12–15%. Южные склоны усиливают радиацию на 5–12%.

~ Климатические условия и циркуляция: Высокая инсоляция (1550 кВт·ч/м² в Калмыкии, 1450 кВт·ч/м² в Крыму, 1400 кВт·ч/м² в Забайкалье) и низкая летняя облачность (15–25%) обеспечивают стабильную генерацию. Антициклоны и умеренные ветра (3–8 м/с) минимизируют снеговые и ветровые риски.

~ Энергетический вклад: СЭС покрывают 10% баланса Калмыкии (70 млн.кВт·ч/год), 7–10% Крыма (300 млн.кВт·ч/год) и 20% удалённых зон Забайкалья (3 млн.кВт·ч/год), снижая зависимость от угля, газа и дизеля.

~ Экономические эффекты: СЭС экономят топливо (100–875млн. руб./год), привлекают инвестиции (3–15 млрд. руб.) и создают рабочие места (60–600), поддерживая аграрный, туристический и удалённый сектора.

~ Социальные выгоды: СЭС обеспечивают надёжное энергоснабжение (перебои сокращены на 20–50%), снижают выбросы CO₂ (3–200 тыс. т/год) и улучшают качество жизни, включая туризм Крыма (2 млн. чел./год) и поселения Забайкалья.

Климатические тренды (рост радиации +50–242 МДж/м² за 1981–2013, снижение облачности) усиливают рентабельность СЭС. Сравнение с Краснодарским краем, Алтаем и Андалусией подтверждает конкурентоспособность регионов.

Исследование демонстрирует стратегическую роль СЭС в укреплении народного хозяйства, предлагая основу для их дальнейшего развития с учётом метеорологических и орографических факторов.

Рекомендации:

На основе климатического анализа исследуемых регионов были выявлены перспективные площадки для дальнейшего развития солнечной энергетики – Черноземельский (Калмыкия), Ленинский (Крым), Борзинский (Забайкалье)

Также было выяснено, что исследуемые районы являются подходящими для СЭС мощностью 10–100 МВт. Рекомендуется внедрять трекинг-системы там, где они не были реализованы изначально, а также гибридные решения (на примере дизельно-солнечных станций) и пылеотталкивающие покрытия светопоглощающих панелей для повышения эффективности выработки электроэнергии.

Список литературы

1. Акимов, В.А. Возобновляемая энергетика в России: потенциал и перспективы / В.А. Акимов, И.В. Сидоров. – М.: ФГБУ ВНИИ ГОЧС (ФЦ), 2020. – 180 с.
2. Барышникова, О.В. Климатические ресурсы степных зон России для возобновляемой энергетики / О.В. Барышникова. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2023. – 160 с.
3. Бутузов, В.А. Солнечная энергетика: технологии и перспективы / В.А. Бутузов. – М.: Изд. дом МЭИ, 2022. – 256 с.
4. Гиря, А.В. Климатические ресурсы Забайкальского края для солнечной энергетики / А.В. Гиря, Е.В. Носкова. – Чита: ЗабГУ, 2022. – 128 с.
5. Голицын, Г.С. Альтернативные источники энергии: гидрометеорологические аспекты / Г.С. Голицын, А.А. Васильев. – М.: КРУК, 2018. – 320 с.
6. Дегтярев, К.С. Метеорологические условия для солнечной энергетики в Калмыкии / К.С. Дегтярев. – Элиста: КалмГУ, 2019. – 144 с.
7. Доклад об особенностях климата на территории Российской Федерации за 2024 год. – М.: Росгидромет, 2025. – 112 с.
8. Жучков, А.В. Экономическая эффективность СЭС в регионах России / А.В. Жучков, И.А. Петров. – М.: Инфра-М, 2022. – 200 с.
9. Иванов, С.П. Энергетическая эффективность СЭС в условиях степных ландшафтов / С.П. Иванов, А.Г. Смирнов. – М.: Энергия, 2024. – 200 с.
10. Кислов, А.В. Климатология: учебник / А.В. Кислов, Г.В. Суркова. – 5-е изд., испр. и доп. – М.: Инфра-М, 2023. – 340 с.
11. Малашенков, Б.М. Солнечная энергетика Крыма: метеорологические и экономические аспекты / Б.М. Малашенков, С.К. Сычев. – Симферополь: КФУ, 2015. – 216 с.
12. Минэнерго РФ. Стратегия развития возобновляемой энергетики в Российской Федерации до 2030 года– М.: Минэнерго РФ, 2025. – [Электронный

ресурс]. URL: https://minenergo.gov.ru/strategy/renewable_energy_2030 (дата обращения: 16.06.2025).

13. Носкова, Е.В. Климатические условия Забайкальского края для СЭС / Е.В. Носкова. – Чита: ЗабГУ, 2016. – 112 с.

14. Носкова, Е.В. Потенциал солнечной энергетики в Забайкалье: метеорологические предпосылки / Е.В. Носкова, А.В. Гиря. – Чита: ЗабГУ, 2017. – 136 с.

15. Пиловец, Г.И. Метеорология и климатология: учеб. пособие / Г.И. Пиловец. – М.: Инфра-М, 2021. – 412 с.

16. Пресс-релиз правительства Забайкальского края о вводе Черновской СЭС – Чита: Правительство Забайкальского края, 2022. – [Электронный ресурс]. URL: https://75.ru/news/energy/chernovskaya_ses (дата обращения: 02.06.2025).

17. Renewable Energy Potential in Russia: Regional Analysis / IEA Report. – Paris: International Energy Agency, 2024. – 150 p. [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.iea.org/reports/russia-renewable-energy-2024> (дата обращения: 16.06.2025).

18. Росгидромет: климат и энергетика / Под ред. А.В. Фролова. – М.: СК-Столица, 2023. – 360 с.

19. Справочник по климату СССР. Вып. 13. Солнечная радиация и облачность. – СПб.: Гидрометеиздат, 2018. – 512 с.

20. Справочник по климату СССР. Вып. 14. Температура воздуха и осадки. – СПб.: Гидрометеиздат, 2019. – 496 с.

21. Темникова, Н.С. Климатические ресурсы юга России для энергетики / Н.С. Темникова, И.А. Потехина. – СПб.: РГГМУ, 2020. – 208 с.

22. Характеристика климатических условий Крыма для возобновляемой энергетики / Под ред. Б.М. Малашенкова. – Симферополь: КФУ, 2025. – 180 с.

23. Чередниченко, А.В. Метеорологические условия для СЭС в южных регионах России / А.В. Чередниченко, К.С. Дегтярев. – Ростов-на-Дону: ЮФУ, 2022. – 164 с.

24. Энергетическая стратегия России до 2035 года: возобновляемые

источники / Под ред. В.В. Иванова. – М.: Институт энергетики, 2023. – 248 с.

25. NASA POWER: Solar Radiation Data for Renewable Energy [Электронный ресурс]. – URL: <https://power.larc.nasa.gov/> (дата обращения: 10.05.2025).