



ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МОЩНОСТИ СЕЗОННО-ТАЛОГО СЛОЯ НА ТЕРРИТОРИИ МАГАДАНСКОЙ ОБЛАСТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ ГИДРОГРАФ

✉ Макарьева О.М., Жунусова О.Р., Никитина П.А., Нестерова Н.В., Землянскова А.А.

ФГБУ «Государственный гидрологический институт», Санкт-Петербург, Россия

✉ omakarjeva@yandex.ru

В работе представлен прогноз мощности сезонно-талого слоя (СТС) в районе Верхнеколымского нагорья на основе гидрологической модели «Гидрограф». Модель представляет собой систему с распределенными параметрами, в том числе рассчитывающую баланс тепла и влаги в вертикальном разрезе. Для исследуемого района были выделены ключевые стокоформирующие комплексы (СФК): долины, склоны северной и южной экспозиций, гольцы, которые использовались для параметризации модели. Расчеты выполнены на суточном интервале за период 2015–2099 гг. В качестве климатического сценария использована модель CNRM-CM6-1-HR с высоким пространственным разрешением. Результаты моделирования показали тенденцию увеличения мощности СТС для всех СФК к концу XXI века. Наиболее интенсивный рост прогнозируется для склонов северной экспозиции, где мощность СТС может увеличиться более чем в пять раз. Полученные данные необходимы для оценки изменения мерзлотных условий, водного режима территории и могут быть использованы при инженерных расчетах в условиях деградации многолетнемерзлых пород.

Ключевые слова: сезонно-талый слой, модель Гидрограф, криолитозона, прогноз, изменения климата, стокоформирующие комплексы

Исследование динамики сезонно-талого слоя (СТС) в криолитозоне имеет фундаментальное и прикладное значение в условиях современного глобального изменения климата [Шестернев, 2001; Melnikov et al., 2022]. Мощность и термический режим СТС являются ключевыми факторами, определяющими стабильность геотехнических сооружений, динамику водных ресурсов, эмиссию парниковых газов в регионах распространения многолетнемерзлых пород. Точное прогнозирование пространственно-временной изменчивости СТС представляет собой сложную задачу, требующую учета многочисленных взаимосвязанных процессов тепло- и массообмена, а также ландшафтной дифференциации территории [Методы..., 2004; Гаврильев, 2013]. Использование современных гидрологических моделей, способных интегрировать данные о климате, свойствах подстилающей поверхности и процессах теплообмена, является перспективным подходом для решения данной проблемы [Semenova et al., 2014].

На примере бассейна р. Колымы до пос. Усть-Среднекан (99400 км²), большая часть которого расположена в пределах Верхнеколымского нагорья, проведен прогноз изменения мощности СТС на основе применения гидрологической модели «Гидрограф» и данных климатического моделирования высокого разрешения.

Модель «Гидрограф» [Виноградов, 1988] представляет собой систему с распределенными параметрами, в которой решение задачи динамики тепловой энергии выполняется на основе системы обыкновенных дифференциальных уравнений, а динамика влаги рассчитывается с использованием водно-балансового подхода. Ключевым преимуществом является использование простых входных данных (суточная температура воздуха, дефицит влажности воздуха, осадки), что дает возможность использовать ее практически повсеместно. Для каждого ландшафта строится типичный профиль подстилающей поверхности, свойства которого изменяются по глубине от поверхности растительного покрова до необходимой глубины почвенной колонки [Виноградова и др., 2015].

Ранее параметризация модели «Гидрограф» для бассейна р. Колымы проводилась на данных Колымской водно-балансовой станции [Лебедева, 2018; Лебедева и др., 2015; Макарьева и др., 2020]. К настоящему моменту накоплены новые данные на стационаре Анмангындинская наледь [Васильев, 2022]. Оба объекта считаются репрезентативными для условий горной криолитозоны Северо-Востока.

На основе данных стационаров геокриологические процессы и режим формирования деятельного слоя на территории Верхнеколымского нагорья условно в целях моделирования было разделено на четыре основных типа (рис. 1). Для бассейна р. Колымы до пос. Усть-Среднекан СФК распределились следующим образом: 1) склоны северной экспозиции с редколесьем и сфагново-лишайниковым покровом – 19%; 2) гольцовые ландшафты (каменные осыпи) – 34%; 3) средние части южных склонов, занятые зарослями кедрового стланика – 26%; 4) долины ручьев и рек с лиственничными лесами и мощным моховым покровом – 21%.

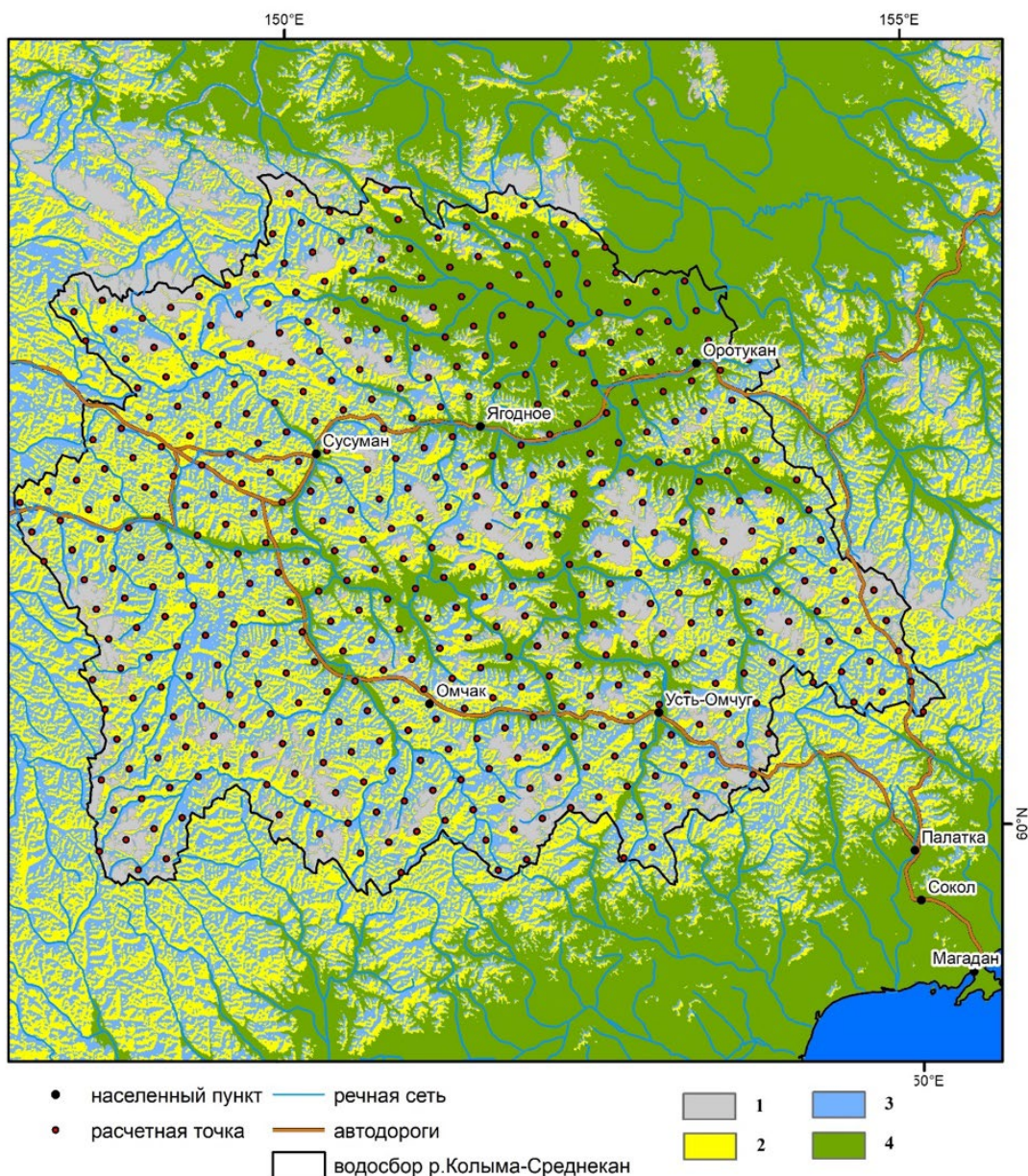


Рис. 1 Распределение СФК в бассейне р. Колыма – пос. Усть-Среднекан.

1 – гольцы, 2 – склоны южной экспозиции, 3 – склоны северной экспозиции, 4 – долины.

Основные параметры для каждого СФК были назначены по репрезентативным для каждого типа ландшафта данным скважинной термометрии. (табл. 1).

Табл. 1. Пункты мониторинга, выбранные для параметризации основных СФК

СФК	Пункт мониторинга	Описание	Основные параметры мерзлоты
Гольцы	Скважина Гольцы (КВБС)	Расположена в гольцовом поясе на высоте 1182 м. Первые 2 м разреза представлены крупнообломочным делювиальным материалом, интервал 2–15 м – коренными породами – гранодиоритами.	$T_{\text{ср}} = -3.8^{\circ}\text{C}$ $\xi = 1.9 \text{ м}$
Склоны южной экспозиции	Скважина Гольцы с учетом растительного покрова		
Склоны северной экспозиции	Площадка CALM (стационар Анмангындинская наледь)	Расположена в делювиально-солифлюкционных отложениях на слабонаклонной слабодренированной поверхности, ориентированной на северо-восток. Лиственничное редколесье на сфагновой мари. Напочвенный покров – сфагнум с вкраплениями ягеля. Микрорельеф – бугристо-западинный.	$\xi \sim 0.5 \text{ м}$
Долины	Скважина Бускэчен (региональная сеть мониторинга мерзлоты Магаданской области)	Расположена в пределах надпойменной террасы реки Бускэчен. Лиственничное редколесье, напочвенный покров – сфагнум и лишайники. Разрез представлен аллювием реки, состоит из крупной окатанной гальки с песчаным и супесчаным заполнителем.	$T_{\text{ср}} = -0.6^{\circ}\text{C}$ $\xi \sim 2 \text{ м}$

$T_{\text{ср}}$ – среднегодовая температура пород на глубине нулевых амплитуд ($^{\circ}\text{C}$), ξ – мощность СТС (м).

В качестве источника климатических данных для прогнозных расчетов на период 2015–2099 гг. были использованы результаты реализации сценария SSP5-8.5 модели земной системы CNRM-CM6-1-HR семейства CMIP6 [Tananaev et al., 2024; Voldoire et al., 2019]. Данная модель была выбрана благодаря высокому пространственному разрешению (шаг сетки выходных данных по горизонтали равен 0.25). В работе [Шихов и др., 2026] показано, что данная модель обеспечивает наиболее высокую точность воспроизведения температуры воздуха для Магаданской области, с величиной средней абсолютной ошибки 4.0° .

Бассейн р. Колыма – пос. Усть-Среднекан был покрыт сеткой расчетных точек, соответствующих узлам климатической модели (рис. 1). Для каждой точки определялся доминирующий СФК. Расчеты мощности СТС выполнялись на суточном интервале. Из результатов моделирования для каждого года и каждой расчетной точки извлекались максимальные годовые значения мощности СТС, которые затем осреднялись для четырех временных периодов: ближайшей перспективы (2015–2025 гг.), середины века (2026–2050 гг.), второй половины (2051–2075 гг.) и конца века (2076–2099 гг.). Пространственный анализ результатов осуществлялся путем интерполяции данных с расчетных точек на всю территорию исследуемого района.

Результаты моделирования продемонстрировали однозначную тенденцию к увеличению средней максимальной мощности сезонно-талого слоя для всех выделенных стокоформирующих комплексов на протяжении всего прогнозируемого периода до 2099 года (табл. 2). Анализ пространственно-временной динамики СТС позволил выявить закономерности для каждого типа ландшафта.

Мощность СТС с 2015 по 2099 гг. увеличится для всех СФК (рис. 2). Для гольцов, сухих южных склонов мощность СТС увеличится в полтора раза (~ на 0.7 м) до 2.1-2.2 м. В долинах мощность СТС увеличится ~ на 1 м до средних значений 3.3 м, это связано с влиянием водотоков на геокриологические условия долин. Максимальная мощность СТС в будущем прогнозируется для ландшафта «долины». Эта закономерность прослеживается как для современного периода (2015–2025 гг.), так и для периода конца XXI века (2076–2099 гг.).

Табл. 2. Прогнозируемая максимальная мощность СТС (м) для основных СФК

СФК / Период	2015-2025	2026-2050	2051-2075	2076-2099
Гольцы	1.4	1.5	1.8	2.1
Долина	2.3	2.6	3.0	3.3
Склоны северной экспозиции	0.4	0.6	1.1	2.2
Склоны южной экспозиции	1.5	1.6	1.9	2.2

Наименьшие значения СТС – 0.4 м – характерны для склонов северной экспозиции для всех периодов с 2015 по 2050 гг. Однако именно здесь прогнозируются наиболее сильные изменения. В период 2051-2074 гг. мощность СТС увеличится до 1.1 м, а в последний период 2076–2099 гг. мощность СТС удвоится и достигнет значений, характерных для сухих склонов южной экспозиции – 2.2 м. Эти резкие скачки связаны с резким изменением условий протаивания и промерзания после вытаявания льда в слое торфяной залежи, находящейся под толстым слоем мохово-лишайникового покрова. В расчетах его средняя мощность была принята равной 1 м.

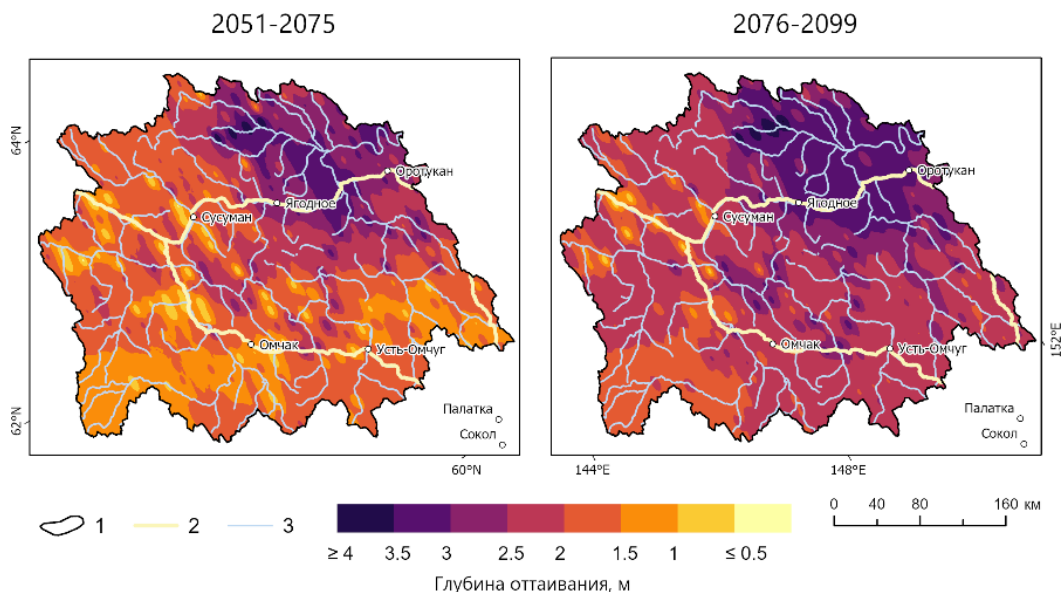


Рис. 2. Прогноз мощности СТС на периоды 2051-2075 гг., 2076-2099 гг.

1 – граница водосбора, 2 – дорога, 3 – речная сеть.

Пространственный анализ показал, что наибольшие абсолютные значения мощности СТС характерны для восточной части исследуемой территории, где «долины» занимают наибольшие площади. Наименьшие глубины протаивания приурочены к западной высокогорной части бассейна, где преобладают гольцовые ландшафты и склоны северной экспозиции. Указанная пространственная закономерность сохраняется на протяжении всего прогнозного периода.

Проведенное моделирование с использованием гидрологической модели «Гидрограф» позволило получить количественные оценки изменения мощности сезонно-талого слоя до конца XXI века. Установлена устойчивая тенденция к увеличению СТС для

всех типов ландшафтов, наиболее выраженная для склонов северной экспозиции. Полученные данные необходимы как для оценки изменения водного режима Северо-Востока, так и в практическом плане – для оценки характеристик мерзлоты в инженерных расчетах в условиях ее деградации.

ЛИТЕРАТУРА

Васильев А.И. Современное состояние ландшафтов водосборного бассейна реки Анмангында // Устойчивость природных и технических систем криолитозоны в условиях изменения климата: материалы Всероссийской конференции с международным участием, посвященной 150-летию М.И. Сумгина. Якутск, 2022. С. 182–186.

Виноградов Ю.Б. Математическое моделирование процессов формирования стока: опыт критического анализа. Л.: Гидрометеиздат, 1988. 312 с.

Виноградов Ю.Б., Семенова О.М., Виноградова Т.А. Гидрологическое моделирование: метод расчета динамики тепловой энергии в почвенном профиле (Часть 1) // Криосфера Земли. 2015. Т. 19. № 1. С. 11-21.

Гаврильев Р.И. Каталог теплофизических свойств горных пород Северо-Востока России. Якутск: Изд-во Институт мерзлотоведения им. П.И. Мельникова, 2013. 172 с.

Лебедева Л.С. Формирование речного стока в зоне многолетней мерзлоты Восточной Сибири: дис. ... канд. геогр. наук. М.: Изд. Ин-та географии РАН, 2018. 125 с.

Лебедева Л.С., Семенова О.М., Виноградова Т.А. Расчет глубины сезонноталого слоя в условиях различных ландшафтов Колымской водно-балансовой станции на основе гидрологической модели «Гидрограф» (Часть 2) // Криосфера Земли. 2015. Т. 19. № 2. С. 35-44.

Макарьева О.М., Лебедева Л.С., Виноградова Т.А. Моделирование процессов формирования стока на малых горных водосборах криолитозоны (по материалам Колымской водно-балансовой станции) // Криосфера Земли. 2020. Т. 24. № 1. С. 43-56. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2020-1(43-56)

Методы геоэкологических исследований / ред. Э.Д. Ершова. М.: МГУ, 2004. 512 с.

Шестернев Д.М. Криогипергенез и геотехнические свойства пород криолитозоны. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2001. 266 с.

Шихов А.Н., Землянская А.А., Макарьева О.М., Никитина П.А. Оценка применимости глобальных моделей CMIP6 для прогноза изменений климата и повторяемости опасных природных явлений на территории Магаданской области // Метеорология и гидрология. 2026, № 1 (в печати)

Melnikov V.P., Osipov V.I., Brukhkov A.V., Badina S.V., Sadurtdinov M.R., Drozdov D.S., Fedorov R.Y. Past and future of permafrost monitoring: Stability of Russian energetic infrastructure // Energies. 2022. Vol. 15. Is. 9, 3190. doi: 10.3390/en15093190

Semenova O., Vinogradov Y., Vinogradova T., Lebedeva L. Simulation of soil profile heat dynamics and their integration into hydrologic modelling in a permafrost zone // Permafrost and Periglacial Processes. 2014. Vol. 25. Is. 4. P. 257-269. doi: 10.1002/ppp.1820

Tananaev N.I. Regional ensemble of CMIP6 global climate models for Sakha (Yakutia) Republic, Northern Eurasia // Polar Science. 2024. Vol. 41, 101066. doi: 10.1016/j.polar.2024.101066

Voldoire A., Saint-Martin D., Sénésiet S. al. Evaluation of CMIP6 DECK Experiments With CNRM-CM6-1 // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. 2019. Vol. 11. Is. 7. P. 2177–2213. doi: 10.1029/2019MS001683

ACTIVE LAYER THICKNESS PROJECTIONS IN THE MAGADAN REGION USING HYDROLOGICAL MODEL HYDROGRAPH

Makarieva O.M., Zhunusova O.R., Nikitina P.A., Nesterova N.V., Zemlianskova A.A.

For the territory of the Verkhnekolymsky Highlands, a forecast of the dynamics of the active layer thickness was made using the Hydrograph model. The model is a system with distributed parameters that solves the equations of heat and moisture dynamics. Key runoff-forming complexes (RFCs) were identified for the area under study: valleys, slopes of the northern and southern exposures, and rocky talus that were used to parameterize the model. The calculations were performed on a daily basis for the period 2015-2099. The results of the CNRM-CM6-1-HR model with high spatial resolution are used as a climate scenario. The simulation results showed a tendency to increase the active layer thickness (ALT) for all RFCs by the end of the 21st century. The most intensive increase is predicted for the slopes of the northern exposure, where the capacity of the ALT may increase by more than five times. The data obtained are necessary to assess changes in permafrost conditions and the water regime of the territory and can be used in engineering calculations under conditions of permafrost degradation.

Keywords: *active layer thickness, Hydrograph model, cryosphere, projections, climate change, runoff-forming complexes*

REFERENCES:

- Vasiliev A.I.* Current State of Landscapes in the Anmangynda River Basin. In: Sustainability of Natural and Technical Systems in the Cryolithozone under Climate Change: Proceedings of the All-Russian Conference with International Participation dedicated to the 150th Anniversary of M.I. Sumgin. Yakutsk, 2022. P. 182–186. (in Russian).
- Vinogradov Yu.B.* Mathematical Modeling of Runoff Formation Processes: A Critical Analysis Experience. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1988. 312 p. (in Russian).
- Vinogradova T.A., Semenova O.M., Vinogradov Yu.B.* Hydrological Modeling: A Method for Calculating the Dynamics of Thermal Energy in a Soil Profile (Part 1) // *Earth's Cryosphere*. 2015. Vol. 19. No. 1. P. 11-21. (in Russian).
- Gavriliev R.I.* Catalog of Thermophysical Properties of Rocks in the North-East of Russia. Yakutsk: Institute of Permafrost Studies Publ., 2013. 172 p. (in Russian).
- Lebedeva L.S.* River Runoff Formation in the Permafrost Zone of Eastern Siberia. Cand. Sci. (Geogr.) Dissertation. Moscow: Institute of Geography RAS. 2018. 125 p. (in Russian).
- Lebedeva L.S., Semenova O.M., Vinogradova T.A.* Calculation of the Active Layer Thickness under Different Landscapes of the Kolyma Water-Balance Station Using the "Hydrograph" Hydrological Model (Part 2) // *Earth's Cryosphere*. 2015. Vol. 19. No. 2. P. 35-44. (in Russian).
- Makarieva O.M., Lebedeva L.S., Vinogradova T.A.* Modeling of Runoff Formation Processes in Small Mountainous Catchments of the Cryolithozone (Based on Materials from the Kolyma Water-Balance Station) // *Earth's Cryosphere*. 2020. Vol. 24. No. 1. P. 43-56. doi: 10.21782/KZ1560-7496-2020-1(43-56)
- Methods of Geocryological Research.* Ed. by E.D. Yershov. Moscow: Moscow State University Press, 2004. 512 p. (in Russian).
- Shesternev D.M.* Cryohypergenesis and Geotechnical Properties of Cryolithozone Rocks. Novosibirsk: Siberian Branch of RAS Publ., 2001. 266 p. (in Russian).
- Shikhov A.N., Zemlianskova A.A., Makarieva O.M., Nikitina P.A.* Assessment of applicability of CMIP6 global climate models for predicting climate change and natural hazards in the Magadan region // *Meteorology and Hydrology*. 2026. No 1 (in press).
- Melnikov V.P., Osipov V.I., Brukhkov A.V., Badina S.V., Sadurtdinov M.R., Drozdov D.S., Fedorov R.Y.* Past and future of permafrost monitoring: Stability of Russian energetic infrastructure // *Energies*. 2022. Vol. 15. Is. 9, 3190. doi: 10.3390/en15093190
- Semenova O., Vinogradov Y., Vinogradova T., Lebedeva L.* Simulation of soil profile heat dynamics and their integration into hydrologic modelling in a permafrost zone // *Permafrost and Periglacial Processes*. 2014. Vol. 25. Is. 4. P. 257-269. doi: 10.1002/ppp.1820
- Tananaev N.I.* Regional ensemble of CMIP6 global climate models for Sakha (Yakutia) Republic, Northern Eurasia // *Polar Science*. 2024. Vol. 41, 101066. doi: 10.1016/j.polar.2024.101066
- Voldoire A., Saint-Martin D., S  n  siet S. al.* Evaluation of CMIP6 DECK Experiments With CNRM-CM6-1 // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. 2019. Vol. 11. Is. 7. P. 2177–2213. doi: 10.1029/2019MS001683