

Сборник докладов международной научной конференции памяти выдающегося русского гидролога Юрия Борисовича Виноградова

**ТРЕТЬИ ВИНОГРАДОВСКИЕ ЧТЕНИЯ
ГРАНИ ГИДРОЛОГИИ**

Под редакцией к.т.н. О.М. Макарьевой

Санкт-Петербургский государственный университет

Россия

28-31 марта 2018

**Международная конференция памяти выдающегося
русского гидролога Ю.Б. Виноградова
ТРЕТЬИ ВИНОГРАДОВСКИЕ ЧТЕНИЯ «ГРАНИ ГИДРОЛОГИИ»**

Организаторы Кафедра гидрологии суши, Институт наук о
Земле, Санкт-Петербургский государственный
университет

Научная Группа модели Гидрограф

Председатель д.г.н., профессор В.В. Дмитриев,
Программного комитета Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский
государственный университет

Председатель к.т.н. О.М. Макарьева,
Организационного Научная группа модели Гидрограф,
комитета Институт наук о Земле, Санкт-Петербургский
государственный университет

Спонсоры ООО «НПО «Гидротехпроект»,
Санкт-Петербург

АНО НИЦ «Геодинамика»
Южно-Сахалинск

Российский Фонд Фундаментальных
Исследований

Исследование формирования речного стока в Российской части бассейна Западной Двины с использованием гидрологической модели SWAT

Терский П.Н.¹, Кулешов А.А.²

¹*Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия*

²*Технологический Университет Дрездена (TU Dresden), Дрезден, Германия*

pavel_tersky@mail.ru

Аннотация: В статье рассмотрен подход к решению задачи моделирования стока р. Западной Двины (российской части) с использованием открытой гидрологической модели SWAT на основе открытых пространственных и гидрометеорологических данных. На основании сравнительного статистического анализа данных метеорологических наблюдений и данных реанализа предложены рекомендации по использованию метеоинформации и подготовлена база ежедневных метеоданных в формате модели SWAT. Первичный анализ результатов моделирования стока позволил сделать выводы об оптимальных исходных данных о водосборе и методике определения элементарных водосборов. Приведены результаты оценки чувствительности параметров модели и результаты их калибровки для среднемесячного и ежедневного временного шага расчета речного стока.

Ключевые слова: гидрологическое моделирование, речной сток, Западная Двина, SWAT, калибровка параметров, чувствительность и неоднозначность модели

Введение

В данной работе рассмотрена Российская часть бассейна Западной Двины в замыкающем створе г. Велиж (площадь водосбора 17250 км²). Западная Двина – трансграничная река, протекающая по территории России, Белоруссии, Латвии, Эстонии и Литвы. Один из шагов развития международного сотрудничества в сфере управления водными ресурсами - получение достоверной гидролого-гидрохимической картины на основе надежных информативных методов, основанных на единых принципах и подходах, принятых в мировом сообществе.

Цель – создать рабочую гидрологическую модель водосбора для заполнения пропусков в рядах наблюдений, для дальнейшей оценки влияния хозяйственной деятельности в бассейне на качество воды, прогноза притока растворенных и взвешенных веществ к границе РФ на основе принятых в мировой практике методов и открытых исходных данных. Реки бассейна Западной Двины в российской части не зарегулированы, не подвержены высокой антропогенной нагрузке и слабо изучены (имеются ряды наблюдений по 5 метеостанциям в бассейне и ближайшей окрестности и ряды ежедневных расходов воды по 4 гидрологическим постам с различными периодами).

Для целей данной работы выбрана модель открытого использования, обладающая математической основой, в которой заложен комплекс средств расчета стока наносов и биогенных элементов, обладающая высокой чувствительностью к информации о водосборе - гидрологическая модель SWAT (Gassman et. al. 2007). Преимуществами SWAT является наличие обширной и качественной документации, отсутствие ограничений по площади водосбора, совместимость с современными ГИС-пакетами (ArcGIS, QGIS, MapWindow), наличие открытой внешней программы автокалибровки SWAT-CUP (Abbaspour et. al, 2015), а также наличие открытой электронной библиотеки тематических публикаций и профессионального онлайн-сообщества.

Моделирование различных видов стока (воды, растворенных веществ, взвешенных наносов) основано на расчете формировании речного стока и его параметризации. Общая схема подготовки модели ежедневного и среднемесячного стока приведена на рис. 1.

Моделирование стока с помощью модели SWAT проходит в несколько этапов:

1 этап - создание модели водосбора с использованием ГИС-интерфейса ArcSWAT v.2012. В настоящей работе использованы следующие исходные данные:

- цифровые модели рельефа (SRTM v.4 - разрешение 30 м (<http://earthexplorer.usgs.gov>), ALOS PALSAR RTC - разрешение 12.5 м (<https://www.asf.alaska.edu>);

- база данных почв мира HWSD FAO (<http://www.fao.org>)

- растровые слои ландшафтов и землепользования Globcorine разрешением 300 м (http://due.esrin.esa.int/page_project114.php) и Globallandcover разрешением 30 м (<http://www.globallandcover.com>).

2 этап - подготовка метеорологических данных. В качестве исходных метеоэлементов используются ежедневные температура воздуха (минимальная TMN и максимальная TMX), осадки (PCP), относительная влажность (HMD), скорость ветра (WND) суммарная солнечная радиация (SOL).

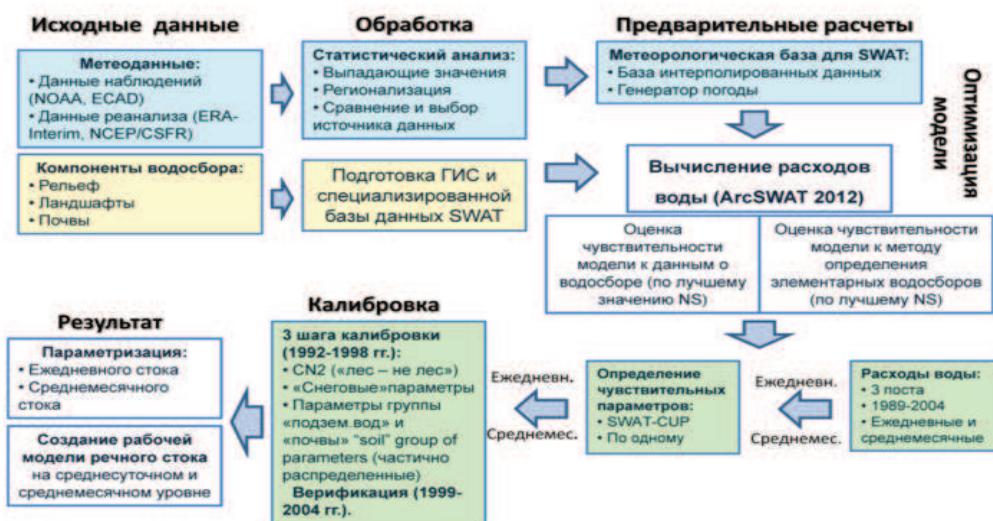


Рис. 1 Блок-схема подготовки данных и выполнения расчетов стока р. Западная Двина (в створе г. Велиж) с использованием гидрологической модели SWAT

Метеорологические данные – основа водобалансовых расчетов в гидрологической модели. Для подготовки базы метеоданных проведен сравнительный анализ двух различных источников метеорологической информации за период 1981 по 2016 год: это реанализ метеорологических полей ERA-Interim (<https://www.ecmwf.int>) и данные метеонаблюдений с двух крупнейших ресурсов: GSOD NCDC/NOAA (<https://data.noaa.gov>) и ECA&D (www.ecad.eu). Данные наблюдений были обработаны на предмет выбросов и неправдоподобных значений. Результаты показали, что экстремальные суммы осадков, равные 75, 150 и 300 мм за день из NOAA являются выбросами (и не совпадают с данными ECA&D). Величины температур, осадков и скорости ветра были проанализированы с помощью методов робастной статистики. Принимая во внимание зависимость высот метеостанций над уровнем моря, и связанное с этим изменение в тенденциях распределения этих величин, были установлены пороговые значения для каждого месяца, выходя за которые суточные значения температур, скорости

ветра и осадков считались ошибочными. Впоследствии они заменялись опорными значениями с «надежных» метеостанций с помощью метода обратных взвешенных коэффициентов корреляции (Young 1992). Для сравнения полученных результатов с данными реанализа, была произведена интерполяция данных метеостанций по сетке, соответствующей самому высокому разрешению в ERA-Interim на ежедневной основе.

Полученные результаты показали, что TMN, TMX для реанализа и интерполированных метеоданных в хорошей зависимости друг от друга (коэффициент корреляции (R) и согласованности (D) более 0,99).

Среди метеорологических данных самыми ненадежными являются ежедневные суммы осадков. Коэффициенты пространственной корреляции (R) между соседними станциями (Велиж, Белый, Торопец, Великие Луки и Смоленск) меняются от 0.21 до 0.74, данные не согласованы во времени. Что касается WND - данные реанализа значительно переоценивают скорость ветра по сравнению с интерполированными метеоданными, несмотря на высокий коэффициент корреляции ($R = 0.86$). Данные реанализа и интерполированные данные со станций согласуются слабо из-за высокой разницы между среднегодовыми амплитудами скорости ветра (1.38 м/с), в целом реанализ переоценивает метеоданные на 33%. Одна из возможных причин - недоучет шероховатости поверхности в реанализе для данного региона.

З этап – Выполнение калибровки и верификации параметров модели на основе данных гидрологических наблюдений. Ряды наблюдения за расходами воды на гидрологических постах р. Велеса - Рудня, р. Торопа - Старая Торопа и р. Западная Двина - Велиж, непрерывные за период 1992-2004 гг, обусловили выбор периода для работы модели: 1989-1992 – warm-up (период «разогрева»), 1992-1998 – период калибровки, 1999-2004 – период верификации модели месячного и ежедневного стока. Данный период является средним по водности для р. Западной Двины в соответствии с результатом анализа разностно-интегральной кривой годового стока в створе г. Велиж. Калибровка проводилась по данным наблюдений за расходами воды на посту Велиж на основе критерия Нэша-Сатклиффа (NS), выбранного в качестве целевой функции.

Результаты

Расчеты компонентов водного баланса российской части бассейна Западной Двины в модели SWAT за период 1992-2004 показали, что вычисленные среднегодовые компоненты имеют адекватные значения и соответствуют измеренным: суммарный слой стока составляет 278 мм/год (по данным наблюдений 275 мм/год), слой испарения 379 мм/год (по данным ДЗЗ MODIS за 2000 – 2011- MOD16 Global слой испарения для выбранного бассейна составляет 395 мм).

В бассейне Западной Двины внутригодовое распределение речного стока генетически неоднородно. В данной работе реализован подход, основанный на отборе чувствительных параметров по одному вручную, поскольку стандартный подход автокалибровки всего перечня параметров и выбор чувствительных на основе стандартных статистических подходов себя не оправдал и привел к выраженной эквифинальности модели. В первую очередь с использованием программы SWAT-CUP откалиброван основной распределенный параметр - номер кривой связи "сток - осадки" для залесенных и незалесенных территорий. Далее, параметры, определяющие талый сток, процессы снегонакопления и снеготаяния были объединены в группу и откалиброваны отдельно от остальных. Отдельно калибровались параметры, отражающие взаимодействие поверхностных вод с почвами и подземными водами, с учетом найденных в процессе калибровки диапазонов суглинистых параметров. В результате выполнения калибровки и верификации модели получен набор чувствительных параметров и их значений для среднемесячного и ежедневного стока (табл.1).

Табл. 1 Результаты калибровки чувствительных параметров модели Западной Двины (в створе г. Велиж) для суточного и месячного шага расчета водного стока

№ пп	Параметр	Описание параметра	Диапазон значений	Модель среднемесячно го стока	Модель ежедневного ст ока
1	CN2_FRST	Номер кривой связи "сток - осадки" для залесенных территорий	35 - 98	64-69	42.5
2	CN2_RNGE	Номер кривой связи "сток - осадки" для территории без леса (луга, поля, пастбища)	35 - 98	77-83	58-62
3	SFTMP	Температура воздуха, ниже которой выпадают осадки только в виде снега, °C	-20 - +20	0.70	1.93
4	SMTMP	Температура начала снеготаяния, °C	-20 - +20	5.31	2.12
5	SMFMX	Максимальный слой стаивания мм H ₂ O/(°C·день)	0 - 20	12.0	4.07
6	SMFMN	Минимальный слой стаивания мм H ₂ O/(°C·день)	0 - 20	3.92	2.77
7	SNOCOVMX	Минимальное содержание воды в снеге, соответствующее 100% снежному покрову	0 - 500	57	137
8	SNO50COV	Доля воды в снеге от момента начала схода снега, соответствующее 50% снежному покрову	0 - 1	0.23	0.32
9	SOL_AWC	Свободная влага почвы, мм H ₂ O/мм почвы	0 - 1	0.19-0.34	0.10-0.17
10	GWQMN	Минимальная глубина залегания воды в первом водоносном горизонте, при которой возможен водообмен с поверхностью (мм)	0 - 5000	1443	644
11	GW_DELAY	Запаздывание грунтовых вод (дни)	0 - 500	22.6	12.3
12	RCHRG_DP	Доля фильтрации в глубокий водоносный горизонт	0 - 1	0.17	0.45
13	GW_REVAP	Коэффициент испарения влаги непосредственно из почвы	0,02 - 2	0.04	0.06
14	ALPHA_BF	Фактор меженного стока (1/день)	0 - 1	0.53	0.23
15	TIMP	Коэффициент запаздывания изменения температуры снега при достижении среднесуточной температуры снеготаяния отношению к температуре воздуха	0 - 1	0.09	0.14
16	ESCO	Почвенный компенсационный фактор испарения из верхних горизонтов	0 - 1	0.93	Не чувствительный параметр
17	REVAPMN	Максимальная глубина залегания воды в первом водоносном горизонте, при которой происходит испарение из почвы (мм)	0 - (500)	787	912
18	CN_FROZ	Коэффициент фильтрации для промерзшей почвы	0,0001 - 0,9	Не чувствительны й параметр	0.264
R ²		Коэффициент детерминации		0.83/0.78*	0.80/0.76*
NS		Критерий Нэша-Сатклиффа (целевая функция)		0.77/0.76*	0.72/0.71*
PBIAS %		Среднеквадратической отклонение %		-11.5/-15.5*	-22.4/-24.7*
Оценка качества модели (Moriasi 2007)				хорошее	хорошее/удовле творительное

* - Калибровка (1992-1998 гг)/Верификация (1999-2004 гг)

Выводы

Ежедневные данные реанализа о скорости ветра завышены примерно на 33% по сравнению с данными наблюдений. В качестве исходных метеоданных рекомендуется использовать данные наблюдений по всем характеристикам, пропущенные значения

заполнять интерполированными величинами, отсутствующие данные о суммарной солнечной радиации получать из данных реанализа ERA-Interim.

Моделирование ежедневного стока, в отличие от среднемесячного, крайне чувствительно к данным о подстилающей поверхности водосбора. Для расчета ежедневного стока рекомендуется использовать наиболее детальные пространственные данные о рельфе (который определяет уклоны поверхности внутри водосбора), и о распределении ландшафтов (которое определяет разбиение бассейна на элементарные водосборы и существенно влияет на результаты моделирования стока).

Определены чувствительные параметры и вычислены их количественные значения для модели водного стока среднемесячного и ежедневного расчетного шага.

Модель SWAT пригодна для выполнения расчетов речного стока с высокой достоверностью для р. Западной Двины с высокой долей талого стока в годовом гидрологическом цикле и слабой гидрометеорологической изученностью при реализации поэтапной калибровки распределенных и сосредоточенных параметров в зависимости от их природы.

Список литературы

- 30-meter GlobalLand cover data product, 2014. [Электронный ресурс], доступ по ссылке: <http://www.globallandcover.com/> [18.07.2017]
- Abbaspour K.C., Vejdani M., Haghight S. SWAT-CUP calibration and uncertainty programs for SWAT. Proc. Intl. Congress on Modelling and Simulation (MODSIM'07). 2007. P. 1603–1609.
- European Climate Assessment & Dataset (ECA&D) (2013). European Climate Support Network of EUMETNET: 70 pp [Электронный ресурс], доступ по ссылке: www.ecad.eu/ [18.07.2017]
- Gassman P., Reyes M., Green C., Arnold J. (2007), The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions // Transactions of the ASABE, vol. 50, issue 4, pp. 1211-1250
- Global Surface Summary of the Day (NOAA) [Электронный ресурс], доступ по ссылке <https://data.noaa.gov> [18.05.2017]
- GLOBCORINE, 2010 [Электронный ресурс], доступ по ссылке: http://due.esrin.esa.int/page_project114.php [08.05.2017]
- JAXA/METI ALOS-1 PALSAR RTC. Accessed through ASF DAAC, [Электронный ресурс], доступ по ссылке: <https://www.asf.alaska.edu> [15.08.2017]
- Moriasi D.N., Arnold J.G., Van Liew M.W., Bingner R.L., Harmel R.D., Veith T.L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. Amer. Soc. Agric. Biol. Eng., 2007, vol. 50, pp. 885-900
- Nachtergaele, F., Van Velthuizen, H., Verelst, L., Batjes, N., Dijkshoorn, K., Van Engelen, V., Fischer, G., Jones, A., Montanarella, L., Petri, M., et al. (2008) Harmonized World Soil Database. Food Agric. Organ. U. N. [Электронный ресурс], доступ по ссылке <http://www.fao.org> [15.03.2017]
- Young K. (1992). Three-way Model for interpolating for monthly precipitation values. American Meteorology Society: pp. 2561-2569
- Официальный сайт The European Centre for Medium-Range Weather Forecasts (ECMWF) [Электронный ресурс], доступ по ссылке: <https://www.ecmwf.int> [15.03.2017]
- Официальный сайт U.S. Geological Survey. [Электронный ресурс], доступ по ссылке: <http://earthexplorer.usgs.gov/> [15.03.2017]

Flow generation modeling for Zapadnaya Dvina river (Russian part) using SWAT

Terskii P.N.¹, Kuleshov A.A.²

¹*Lomonosov Moscow State University, Russian Federation*

²*Dresden University of Technology Dresden), Германия*

pavel_tersky@mail.ru

Abstract: In this study, river runoff simulation approach, based on the open-access hydrological model SWAT and free spatial hydrometeorological data was presented for Zapadnaya Dvina River catchment (Russian part). The comparative statistical analysis of meteorological observations and reanalysis data was carried out to prepare a daily meteorological database for SWAT. Recommendations were given on the data source using in the modeling process. Preliminary modeling results gave valuable information about optimal input parameters of the river catchment and the method of defining elementary catchments. The results also include the estimation of the model parameters sensitivity and their calibration for river runoff calculation with daily and monthly temporal resolution.

Keywords: Hydrological modeling, river runoff, Zapadnaya Dvina, SWAT, parameter calibration, model sensitivity and uncertainty

Международная конференция памяти
выдающегося русского
гидролога Ю.Б. Виноградова



ТРЕТЬИ ВИНОГРАДОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

ГРАНИ ГИДРОЛОГИИ

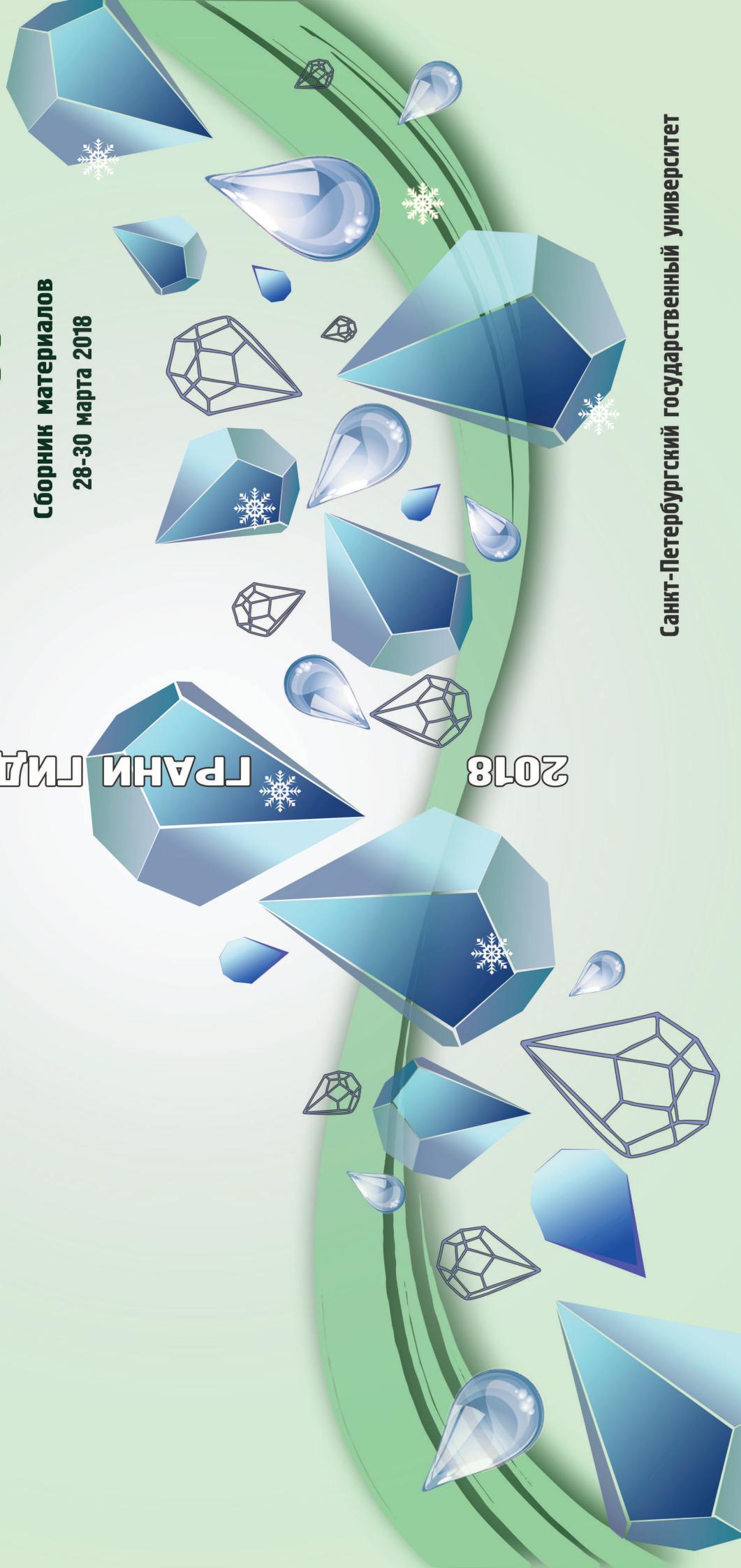
Сборник материалов

28-30 марта 2018

ЛПАНН ЛИПГОУЛИН

2018

ГЭТРИ



Санкт-Петербургский государственный университет