

УДК 504

ДИНАМИКА ТРОФИЧЕСКОГО СТАТУСА ОЗЕРА БИЕНДА-СТЕММЕ (ЗАПАДНЫЙ ШПИЦБЕРГЕН)

Г. Т. Фрумин^{1*}, А. С. Демешкин²

¹ Российский государственный педагогический университет им. А. И. Герцена
(наб. р. Мойки, 48, Санкт-Петербург, Россия, 191186), *gfrumin@mail.ru

² Северо-Западный филиал НПО «Тайфун» (ул. Беринга, 38, Санкт-Петербург,
Россия, 199397)

В статье рассмотрена динамика трофического статуса озера Биенда-Стемме (Западный Шпицберген) за период 2002–2019 гг. Актуальность проведенного исследования обусловлена тем, что трофический статус указанного водоема не был изучен и это не позволяло корректно определить пригодность его воды для питьевого и хозяйственного потребления жителями поселка Баренцбург. Оценка трофического статуса озера Биенда-Стемме выполнена с использованием индекса трофического состояния (ITS), который ранее при изучении этого водоема не применялся. Установлено, что в обозначенный период трофический статус озера варьировал от ультраолиготрофного до эвтрофного. В среднем по величине ITS он характеризуется как мезотрофный. Выявлен значимый положительный тренд ITS за период 2002–2019 гг., что свидетельствует о возрастании трофического статуса озера Биенда-Стемме. Результаты исследования целесообразно применить для принятия эффективных управленческих решений о снижении антропогенной нагрузки на озеро.

Ключевые слова: озеро Биенда-Стемме; эвтрофирование; трофический статус; фосфор общий; климат

Для цитирования: Фрумин Г. Т., Демешкин А. С. Динамика трофического статуса озера Биенда-Стемме (Западный Шпицберген) // Труды Карельского научного центра РАН. 2024. № 5. С. 62–68. doi: 10.17076/lim1905

Финансирование. Работа выполнена в Российском государственном гидрометеорологическом университете в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, проект № FSZU-2023-0002.

G. T. Frumin^{1*}, A. S. Demeshkin². DYNAMICS OF THE TROPHIC STATUS OF LAKE BIENDA-STEMME (WEST SPITSBERGEN)

¹ Herzen State Pedagogical University of Russia (48 Nab. R. Moiki, 191186 St. Petersburg, Russia), *gfrumin@mail.ru

² North-Western Branch of the Typhoon Research and Production Association (38 Beringa St., 199397 St. Petersburg, Russia)

The relevance of the study is associated with the fact that the trophic status of Lake Bienda-Stemme had not previously been studied, making it impossible to properly determine

the suitability of the lake water for drinking and household purposes for residents of the village of Barentsburg. The purpose of the work is to assess the dynamics of the trophic status of Lake Bienda-Stemme (West Spitsbergen). The article examines changes in the trophic status of Lake Bienda-Stemme for the period 2002–2019. The trophic state index (TSI) was used to assess the trophic status. This index has not previously been applied to Lake Bienda-Stemme. It was established that during the indicated period the trophic status of the lake varied from ultraoligotrophic to eutrophic. On average, the TSI-based trophic status of the lake is characterized as mesotrophic. A significant positive TSI trend was identified for the period 2002–2019, indicating an increase in the trophic status of Lake Bienda-Stemme. It is advisable to apply the results of the study to make effective management decisions on reducing the anthropogenic load on the lake.

Keywords: Lake Bienda-Stemme; eutrophication; trophic status; total phosphorus; climate

For citation: Frumin G. T., Demeshkin A. S. Dynamics of the trophic status of Lake Bienda-Stemme (West Spitsbergen). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of the Karelian Research Centre RAS*. 2024. No. 5. P. 62–68. doi: 10.17076/lim1905

Funding. The activities were carried out at the Russian State Hydrometeorological University within state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project #FSZU-2023-0002.

Введение

Среди современных проблем водной экологии центральное место занимает проблема эвтрофирования [Хендерсон-Селлерс, Маркленд, 1990] (синонимы: эвтрофикация, евтрофирование, евтрофикация). Согласно ГОСТ 17.1.1.01-77, «эвтрофированием называется повышение биологической продуктивности водных объектов в результате накопления биогенных элементов под действием антропогенных или естественных факторов». При эвтрофировании происходит резкое увеличение биомассы и первичной продукции фитопланктона, появляются в массе сине-зеленые водоросли, вызывающие «цветение» воды, происходят структурные изменения в сообществах. Поскольку эвтрофирование водоемов стало серьезной глобальной экологической проблемой, по линии ЮНЕСКО началась активная деятельность, связанная с мониторингом внутренних вод и контролем за эвтрофированием водоемов земного шара. Эта работа проводится в разных странах и на разных континентах [Дмитриев, Фрумин, 2004].

Вследствие упрощенности экосистем северные озера более уязвимы к загрязнениям в сравнении с озерами других регионов, поэтому возрастающее по мере их освоения антропогенное воздействие вызывает серьезную озабоченность. Северные водоемы характеризуются высокой чувствительностью к любым изменениям факторов среды как по естественным причинам, так и в результате антропогенного воздействия. Арктические экосистемы, с одной стороны, ограничены сравнительно

узким ареалом и за длительный период адаптировались к специфическим экстремальным условиям, а с другой – характеризуются как наиболее чувствительные и уязвимые экосистемы, влияние климатических вариаций на которые является неоднозначным.

К настоящему времени разработано более пятидесяти критериев оценки трофического статуса водных объектов [Дмитриев, 1995]. Использование индексов трофии, среди которых наиболее популярным в последние годы является индекс Карлсона, не сняло проблему оценки трофности водной экосистемы [Фрумин, Мурадлы, 2020]. Вероятность ошибочной идентификации трофического статуса водоема может быть очень высокой в случаях использования: малоинформативных индексов; одного-единственного индекса трофического статуса; индекса или группы индексов, адаптированных для условий одной климатической зоны, для определения трофности водоемов в другой климатической зоне; индексов, полученных для водных экосистем циклического типа, для водных экосистем транзитного типа, а также проведения идентификации трофического статуса водоема по натурным исследованиям одного года (сезона, съемки) [Дмитриев, 1995].

Озеро Биенда-Стемме является источником воды питьевого и хозяйственного назначения для жителей поселка Баренцбург [Демин и др., 2011]. Это ледниковое озеро расположено на противоположном от поселка берегу залива Гренфьорд. По трубопроводу, проложенному по дну залива, вода поступает в Баренцбург.

Особенностями этого региона являются его малонаселенность (плотность населения

0,05 чел./км²) и незначительная промышленная активность. Одной из основных нагрузок, оказывающих влияние на природу архипелага Шпицберген, является добыча угля и связанная с ней инфраструктура жилых поселков. В последние годы увеличивается нагрузка на экосистему и за счет туристической индустрии, соответственно возрастает количество авто- и мототранспорта, увеличивается число заходов судов в заливы, строится новая инфраструктура.

Цель исследования – оценка динамики трофического статуса озера Биенда-Стемме за период 2002–2019 гг. на основе применения индекса трофического состояния. Ранее подобные исследования не проводились.

Материалы и методы

Озеро Биенда-Стемме располагается на западном берегу залива Гренфьорд (арх. Шпицберген) (рис. 1). Архипелаг Шпицберген находится в Северном Ледовитом океане, в районе 78°09'25" с. ш. и 15°5'51" в. д. Координаты озера 78°3'18" с. ш. и 13°57'55" в. д.

Пробы воды отбирались в зимне-весенний (время наибольшего снегонакопления) и летне-осенний (июль–сентябрь) периоды с подповерхностного (0,5 м ниже поверхности) и придонного (0,5 м выше дна) горизонтов в 2002–2019 гг. В каждый сезон отбирали две пробы. Отбор проб воды производился Северо-Западным



Рис. 1. Залив Гренфьорд с указанием расположения озера Биенда-Стемме, масштаб карты 1:50 000 [Фрумин, Демешкин, 2023]

Fig. 1. Map of Grønfjord Bay showing the location of Lake Bienda-Stemme, map scale 1:50,000 [Frumin, Demeshkin, 2023]

филиалом (СЗФ) ФГБУ НПО «Тайфун». Гидрохимические исследования проб выполнялись в аккредитованной химико-аналитической лаборатории СЗФ ФГБУ «НПО «Тайфун».

Определение водородного показателя pH в воде производилось методом потенциометрии. Для проведения измерения использовался универсальный pH-метр-иономер И-500. Содержание растворенного кислорода определялось титриметрическим методом по количественной реакции йода, выделившегося при фиксации кислорода, с тиосульфатом натрия (модифицированный титриметрический метод Винклера) [РД 52.24.495-2005; РД 52.24.419-2005].

В качестве критерия трофности была выбрана величина pH при нормальном 100%-м насыщении воды кислородом – $pH_{100\%}$. В 1995 г. этот критерий трофности был запатентован (патент № 2050128, 20.12.1995). В монографии [Неверова-Дзиопик, Цветкова, 2020] приведено множество примеров применения индекса ITS для определения трофности водоемов и водотоков, расположенных на территории России и Польши.

Для оценки трофического статуса озера Биенда-Стемме использован индекс трофического состояния (ITS), рассчитываемый по следующей формуле:

$$ITS = \sum_{i=1}^n pH_i / n + a [100 - \sum_{i=1}^n [O_2]_i / n],$$

где pH_i – pH, измеренный за определенный период; $[O_2]$ – кислород, в процентах насыщения; n – количество измерений; a – коэффициент, определяемый по формуле:

$$a = \frac{\sum_{i=1}^n (pH_i \cdot [O_2]) - \frac{\sum_{i=1}^n (pH_i) \cdot \sum_{i=1}^n ([O_2])}{n}}{\sum_{i=1}^n [O_2]^2 - \frac{(\sum_{i=1}^n [O_2])^2}{n}}$$

Уровень трофического статуса оценивали, используя классификацию, приведенную в табл. 1 [Фрумин, Хуан, 2012].

Таблица 1. Классификация критериев трофического статуса

Table 1. Classification of trophic status criteria

Трофический статус Trophic status	ITS
Ультраолиготрофный Ultraoligotrophic	6,3 ± 0,3
Олиготрофный Oligotrophic	7,0 ± 0,3
Мезотрофный Mesotrophic	7,7 ± 0,3
Эвтрофный Eutrophic	> 8,3 ± 0,3

Результаты и обсуждение

Показатель ITS характеризует состояние продукционно-деструкционного баланса, который является важнейшей функциональной характеристикой любых экосистем. Он основан на установленной эмпирической зависимости величины pH воды от насыщения ее кислородом, возникающей при эвтрофировании. В упрощенном виде это можно объяснить так: при увеличении скорости фотосинтеза концентрация диоксида углерода уменьшается, а pH воды, соответственно, увеличивается. Одновременно увеличивается насыщение воды кислородом и при цветении может достигать до 200 % и более.

Величина pH, рассчитанная по найденным зависимостям для нормального 100%-го насыщения воды кислородом, тем больше, чем выше трофический статус водоема, и может служить интегральным показателем его трофического состояния, т. е. состояния его биотического баланса [Алексеев и др., 2007].

Использование зависимости pH и $[O_2]$ очень удобно, так как и pH, и содержание кислорода измеряются при любых исследованиях водоемов уже более 100 лет. Измерение этих показателей доступно, достаточно точно, легко автоматизируется.

Результаты расчетов ITS представлены в табл. 2.

Таблица 2. Динамика трофического статуса озера Биенда-Стемме

Table 2. Dynamics of the trophic status of Lake Bienda-Stemme

Год Year	ITS	Трофический статус Trophic status
2002	7,6	Мезотрофный / Mesotrophic
2003	6,1	Ультраолиготрофный / Ultraoligotrophic
2004	7,6	Мезотрофный / Mesotrophic
2005	6,2	Ультраолиготрофный / Ultraoligotrophic
2006	6,8	Олиготрофный / Oligotrophic
2007	8,0	Мезотрофный / Mesotrophic
2008	7,3	Олиготрофный / Oligotrophic
2009	7,3	«
2010	7,5	Мезотрофный / Mesotrophic
2011	7,0	Олиготрофный / Oligotrophic
2012	7,7	Мезотрофный / Mesotrophic
2013	8,1	Эвтрофный / Eutrophic
2014	7,3	Олиготрофный / Oligotrophic
2015	7,8	Мезотрофный / Mesotrophic
2016	7,6	«
2017	8,0	«
2018	8,2	Эвтрофный / Eutrophic
2019	8,8	«
среднее average	7,5	Мезотрофный / Mesotrophic

Как следует из данных, приведенных в табл. 2, трофический статус озера за рассмотренный период существенно варьировал от ультраолиготрофного в 2003 и 2005 гг. до эвтрофного в 2013, 2018 и 2019 гг. Ранее было отмечено, что вероятность ошибочной идентификации трофического статуса водоема может быть очень высокой в случаях использования данных одного года (сезона, съемки) [Дмитриев, 1995]. Для корректной оценки трофического статуса озера было рассчитано среднее значение ITS за период 2002–2019 гг. Оно составило 7,5, что характеризует трофический статус озера как мезотрофный. Различия ITS между горизонтами и сезонами не рассматривались.

Ранее при использовании метода вероятностной оценки установлено, что трофический статус озера Биенда-Стемме (по содержанию фосфора общего) в основном характеризуется как олиготрофно-мезотрофный (на 59 % олиготрофный и на 27 % мезотрофный) [Фруммин, Демешкин, 2023].

Для оценки тенденции ITS была построена диаграмма (рис. 2). Линия регрессии, приведенная на этом рисунке, описывается следующей формулой:

$$ITS = -161,88 + 0,0839 \text{год} \quad (1)$$

$$n = 18 \quad r = 0,665 \quad r^2 = 0,442 \quad \sigma_{Y(X)} = 0,518 \quad F_p = 12,69 \quad F_T = 4,45.$$

Здесь n – количество значений ITS, r – коэффициент корреляции, r^2 – коэффициент детерминации, $\sigma_{Y(X)}$ – стандартная ошибка, F_p и F_T – расчетное и табличное значения критерия Фишера при уровне значимости 95 %.

Так как $F_p > F_T$, зависимость (1) адекватна [Дрейпер, Смит, 1986]. Иными словами, линия регрессии, приведенная на рис. 2, свидетельствует о наличии положительного тренда, то есть об увеличении ITS и, соответственно, изменении трофического статуса озера в направлении его повышения.

На эвтрофирование водоемов оказывают влияние многие абиотические и биотические факторы. К абиотическим факторам относятся свет, прозрачность, мутность, температура и содержание биогенных веществ. Потепление климата (повышение температуры воздуха), возможно, ключевой фактор, определяющий уровень трофического статуса (рис. 3). Согласно [Карандашева и др., 2021], в Баренцбурге

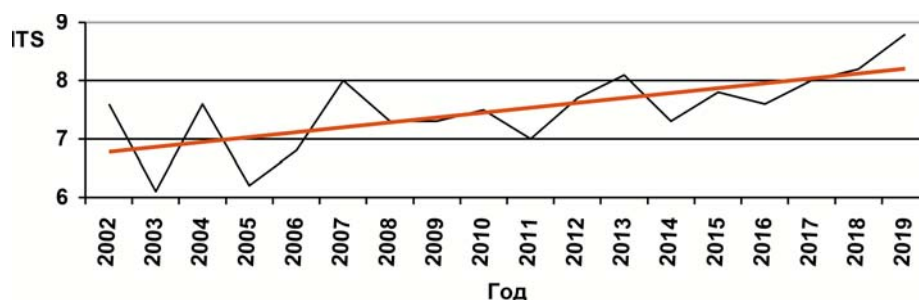


Рис. 2. Динамика индекса ITS
Fig. 2. Dynamics of the ITS index

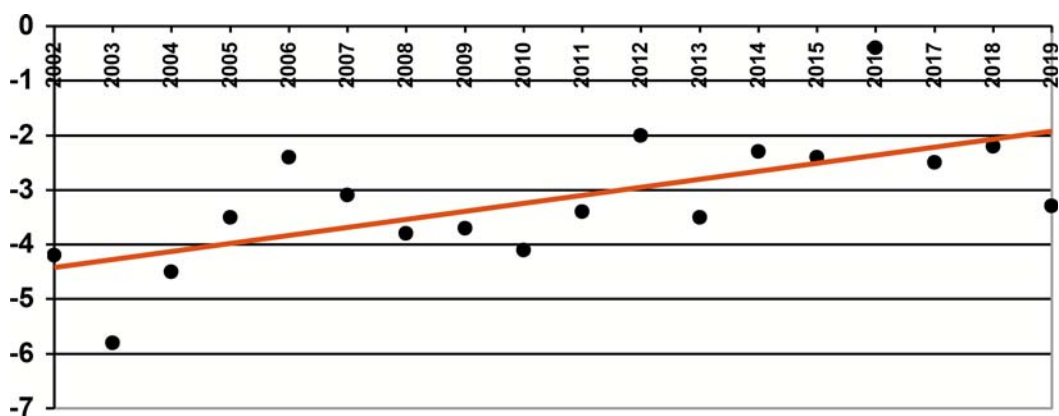


Рис. 3. Динамика среднегодовой температуры приземного слоя атмосферы (Баренцбург)
Fig. 3. Dynamics of the average annual temperature of the surface layer of the atmosphere (Barentsburg)

30-летний «нормальный» период 1991–2020 гг. содержит устойчивую тенденцию к потеплению, что объективно отражает современную специфику климата исследуемого региона.

Линия регрессии, приведенная на рис. 3, описывается следующей формулой:

$$t = -298,42 + 0,147\text{Год} \quad (2)$$

$$n = 18 \quad r = 0,66 \quad r^2 = 0,44 \quad \sigma_{Y(X)} = 0,92 \quad F_p = 12,38 \quad F_T = 4,45.$$

Так как $F_p > F_T$, зависимость (2) адекватна. Линия регрессии на рис. 3 свидетельствует о наличии положительного тренда, то есть об увеличении температуры приземного слоя атмосферы за период 2002–2019 гг.

Заключение

Озеро Биенда-Стемме – основной источник воды питьевого и хозяйственного назначения для жителей поселка Баренцбург. Впервые на основе запатентованного индекса трофического состояния (ITS) проведена оценка трофического статуса озера за 2002–2019 гг. Установлено, что за этот период трофический статус озера в основном характеризуется как мезотрофный. Выявлен значимый положительный тренд ITS за указанный период, что свидетельствует о возрастании трофического статуса озера Биенда-Стемме.

Литература

Алексеев М. И., Цветкова Л. И., Копина Г. И. Методика расчетов региональных нормативов экологического благополучия водных объектов (Невской губы и восточной части Финского залива). СПб.: СПбГАСУ, 2007. 36 с.

Демин Ю. Н., Граевский А. П., Демешкин А. С., Власов С. В., Крылов С. С., Лалетин Н. А. Состояние и тенденции изменения загрязнения окружающей среды в местах хозяйственной деятельности предприятий на архипелаге Шпицберген (поселок Баренцбург и сопредельные территории) за период 2002–2010 гг. СПб.: АНИИ, 2011. 316 с.

Дмитриев В. В. Диагностика и моделирование водных экосистем. СПб.: СПбГУ, 1995. 215 с.

Дмитриев В. В., Фрумин Г. Т. Экологическое нормирование и устойчивость природных систем. СПб.: СПбГУ, РГГМУ, 2004. 294 с.

Дрейпер Н., Смит Г. Прикладной регрессионный анализ. М.: Финансы и статистика, 1986. 366 с.

Карандашева Т. К., Демин В. И., Иванов Б. В., Ревина А. Д. Изменения температуры воздуха в Баренцбурге (Шпицберген) в XX–XXI вв. Обоснование введения новой климатической нормы // Российская Арктика. 2021. № 13. С. 26–39. doi: 10.24412/2658-4255-2021-2-26-39

Неверова-Дзюпик Е., Цветкова Л. И. Оценка трофического состояния поверхностных вод. СПб.: СПбГАСУ, 2020. 176 с.

РД 52.24.495-2005. Руководящий документ. Водородный показатель и удельная электрическая проводимость вод. Методика выполнения измерений электрометрическим методом.

РД 52.24.419-2005. Руководящий документ. Масовая концентрация растворенного кислорода в водах. Методика выполнения измерений иодометрическим методом.

Фрумин Г. Т., Хуан Ж.-Ж. Вероятностная оценка трофического статуса водных объектов. Методическое пособие. СПб.: РГГМУ, 2012. 28 с.

Фрумин Г. Т., Мурадлы М. А. Динамика трофического статуса Нарвского водохранилища (по данным 2011–2019 гг.) // Труды Карельского научного центра РАН. 2020. № 9. С. 65–71. doi: 10.17076/lim1300

Фрумин Г. Т., Демешкин А. С. Вероятностная оценка трофического статуса озера Биенда-Стемме (Западный Шпицберген) // Российская Арктика. 2023. Т. 5, № 4. С. 5–11. doi: 10.24412/2658-4255-2023-4-05-11

Хендерсон-Селлерс Б., Маркленд Х. Р. Умирающие озера. Причины и контроль антропогенного эвтрофирования. Л.: Гидрометеиздат, 1990. 280 с.

References

Alekseev M. I., Tsvetkova L. I., Kopina G. I. A method for calculating regional standards for the ecological well-being of water bodies (Neva Bay and the eastern part of the Gulf of Finland). St. Petersburg: SPbGASU; 2007. 36 p. (In Russ.)

Demin Yu. N., Graevsky A. P., Demeshkin A. S., Vlasov S. V., Krylov S. S., Laletin N. A. State and trends in environmental pollution in places of economic activity of enterprises in the Spitsbergen Archipelago (Barentsburg village and adjacent territories) for the period 2002–2010. St. Petersburg: АНИИ; 2011. 316 p. (In Russ.)

Dmitriev V. V. Diagnostics and modeling of aquatic ecosystems. St. Petersburg: SPbGU; 1995. 215 p. (In Russ.)

Dmitriev V. V., Frumin G. T. Environmental regulation and sustainability of natural systems. St. Petersburg: SPbGU, RGGMU; 2004. 294 p. (In Russ.)

Draper N., Smith G. Applied regression analysis. Moscow: Finansy i statistika; 1986. 366 p. (In Russ.)

Frumin G. T., Huang J.-J. Probabilistic assessment of the trophic status of water bodies. Toolkit. St. Petersburg: RGGMU; 2012. 28 p. (In Russ.)

Frumin G. T., Muradly M. A. Dynamics of the trophic status of the Narva storage reservoir (2011–2019). *Trudy Karelskogo nauchnogo tsentra RAN = Transactions of Karelian Research Centre RAS*. 2020;9:65–71. (In Russ.). doi: 10.17076/lim1300.

Frumin G. T., Demeshkin A. S. Probabilistic assessment of the trophic status of Lake Bienda-Stemme (Western Spitsbergen). *Rossiiskaya Arktika = Russian Arctic*. 2023;5(4):5–11. (In Russ.). doi: 10.24412/2658-4255-2023-4-05-11

Henderson-Sellers B., Markland H. R. Dying lakes. Causes and control of anthropogenic eutrophication. Leningrad: Gidrometeoizdat; 1990. 280 p. (In Russ.)

Karandasheva T. K., Demin V. I., Ivanov B. V., Revina A. D. Air temperature changes in Barentsburg (Spitsbergen) in XX-XXI centuries. Justification for introducing a new climate standard. *Rossiiskaya Arktika = Russian Arctic*. 2021;13:26–39. (In Russ.). doi: 10.24412/2658-4255-2021-2-26-39

Neverova-Dziopik E., Tsvetkova L. I. Assessment of the trophic state of surface waters. St. Petersburg: SPbGASU; 2020. 176 p. (In Russ.)

RD 52.24.495-2005. Hydrogen indicator and specific electrical conductivity of water. Electrometric measurement technique. (In Russ.)

RD 52.24.419-2005. Mass concentration of dissolved oxygen in waters. Measurement method by iodometric method. (In Russ.)

Поступила в редакцию / received: 25.04.2024; принята к публикации / accepted: 23.08.2024.
Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов / The authors declare no conflict of interest.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ:

Фрумин Григорий Тевелевич

д-р хим. наук, профессор, ведущий научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории факультета географии

e-mail: gfrumin@mail.ru

Демешкин Андрей Сергеевич

канд. геогр. наук, директор

e-mail: typhoon.ecol@mail.ru

CONTRIBUTORS:

Frumin, Grigory

Dr. Sci. (Chem.), Professor, Leading Researcher, Research Laboratory, Faculty of Geography

Demeshkin, Andrey

Cand. Sci. (Geog.), Director