

苏联河流冰情

著：B. B. 多波夫

南京地理学院内部发行

苏联河流冰情

〔苏〕P. B. 多钦科

张瑞芳 唐海行 陆德福 蒋光宇 译

赵珂经 校

中国科学技术出版社



译者的话

《苏联河流冰情》一书总结了苏联近一个世纪以来研究河流冰情现象的经验，对河流冰情现象的形成、发展和消融的物理成因及计算方法作了较详细的论证，对河流冰情现象在苏联境内的分布及其特征值的计算成果等也作了阐述。本书内容丰富，简明扼要，具有较好的阅读性和参考价值。

我国黄河流域以北的河流大多有冰情现象，特别是黄河和中苏界河黑龙江及其流域等，其河流流经地区的自然地理和气候条件多变，冰情现象比较复杂，冰塞、冰坝等危险冰情常会阻塞河流，壅高水位，造成堤、坝决口，形成“冬季洪灾”，对工农业生产和国民经济发展造成不良影响。危险冰情现象还会对引水工程、水电站下游造成威胁，影响正常运行。因此，研究我国北方河流的冰情现象及其规律性，以便采取有效措施，防止或减少冰情灾害是我国广大水文工作者的任务。为此，我们将苏联新近出版的这本书译出，供从事这方面的研究、教学和实际工作人员学习和参考。

本书共九章，其中第一章至第六章和第八章以及前言和结束语由张瑞芳译，第七章由唐海行译，第九章由陆德福译，参考文献由蒋光宇译。在翻译过程中，承蒙陈赞庭同志对译稿作了通读，并得到黄河水利委员会水文局和山东河务局的支持，在此谨表感谢。由于我们水平有限，译文不妥和错误之处在所难免，敬请读者批评指正。

1990年8月于北京

序 言

河流冰情是河冰发生、发展和消失过程反复出现的综合。其规律性取决于流域气候条件、河流水量、河床地貌特性及水流的水力学特性。

除了克里米亚南部沿岸、连科兰和科尔希达低地、土库曼的南部以外，在苏联境内几乎所有的河流都有冰情现象。

在大多数河流上，每年都对结冰、封冻及解冻等基本冰情进行观测。苏联欧洲部分的西部地区、北高加索和中亚的平原地区，在秋冬季气温不稳定的年份，具有结冰、解冻反复出现的特点。而在位于北纬 44° 以南的高加索和中亚的山区河流上，很少观测到封冰，而只能在个别河段上观测到。

水电站和其它水工建筑物的建立，使河流冰情发生了根本性的变化，并且在这些建筑物设计和运行时，会产生许多工程问题，能否解决这些问题，取决于能否正确地了解冰情规律和冰情过程的发展特点。这些问题包括：截流、通过束窄的围堰排放冰和冰花、估价因冰的堵塞而造成的坝下热力和结冰条件，以及冰的形成对某些结构的作用等。众所周知，内河航运的开始和终止时间取决于河流的解冻和结冰日期。

现今，无论在研究结冰过程、冰盖的形成和破裂，以及计算方法方面，还是在解决实际生产问题时对这些成果的应用等方面，都取得了一定的成就。

在冰情研究方面作出重大贡献的学者有：Б.Б.普洛斯库利

亚科夫、В.С. 安东诺夫、В.В. 巴兰宁、В.П. 别尔杰尼科夫、Ф.И. 贝京、С.Н. 布拉多夫、Б.М. 金兹布尔格、Я.Л. 戈特里勃、А.М. 叶斯齐费也夫、А.Г. 卡列斯尼柯夫、К.Н. 柯尔日温、Б.П. 潘诺夫、А.И. 别霍维奇、В.В. 比奥特洛维奇、К.И. 洛辛斯基、В.И. 辛诺钦、И.Н. 索柯洛夫、В.А. 雷姆沙、А.Н. 契若夫、Л.Г. 舒里亚科夫斯基等。

上述研究成果已在定期出版的许多专门论文集和专著中发表，有些问题还论述得相当详细。但是有关河流冰情研究的一些主要问题的系统性论著还很少。因此，总结现有的研究成果，对进一步研究冰情现象，以及研究河流冰情可靠的定量计算和预报方法，都是适时的和有益的。

本专著共分九章。第一章简述河流冰情的研究现状。其后的五章分别研究了结冰、冰盖的形成和破裂、冰塞和冰坝的形成，同时还援引了苏联河流冰情过程发展的定量特征和分布图。

第七章论述了在径流调节影响下，河流冰情变化的评估。在这一章中还阐明了水库及其下游冰情规律的特点，研究了由于冬季径流的变化，以及受调节河段水力和地貌的特征而引起的结冰和解冻过程、冰情现象的日期和历时的变化等。

第八章讨论了在河川径流在地域上再分配的影响下，确定河流冰情和热力情况的可能变化，并指出，热流量特性以及冰情现象的日期和历时的变化，在很大程度上取决于取水的数量和规律，以及取水的地点。

最后一章，即第九章叙述河流冰情特征的计算。

本专著援引了出版物中发表的各种理论性解答、实测资料和实验资料，更为大量的是作者本人和国立水文研究所水物理实验室同事们的研究成果，也援引了国外科学家的研究成果。

主要符号说明

- A ——紊流交换系数;
 a ——单位表面积上的冰量, kg/m^2 (千克/米²);
 b ——宽度, m (米);
 C ——谢才系数;
 C_v ——变差系数;
 C_{II} ——圆柱液体系数;
 c ——比热, $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ [焦/(千克·开)];
 d ——晶体的直径, cm (厘米);
 d ——日 (天);
 E ——冰的弹性模数;
 e ——空气湿度, gPa (克·帕);
 F ——面积, m^2 (米²);
 Fr ——弗劳德数;
 f ——阻力系数;
 g ——自由落体的加速度, m/s^2 (米/秒²);
 H ——水位;
 H_{33K} ——冰塞水位;
 H_{3T} ——冰坝水位;
 h ——深度, m (米);
 h ——小时;
 h_a ——水的有效混合层厚度, m (米);
 h_o ——降水量, mm (毫米);
 h_{K} ——结晶冰的厚度, cm (厘米);
 h_x ——冰厚, m (米);
 h_{CH} ——积雪深, m (米);
 h_{IV} ——冰花厚度, m (米);

I ——水面比降;
 I_p ——河床比降;
 k_v ——考虑冰缘移动速度的系数;
 $K_{зим}$ ——冬季流量系数;
 k_o ——热交换减弱系数;
 $k_{y.o}$ ——弹性基础系数;
 L ——位相转换比热, J/kg (焦/千克);
 l ——长度, m (米);
 $L_{в.л.н}$ ——波长, m (米);
 l_n ——冰原长, m (米);
 M ——交换系数;
 m ——质量, kg/m³ (公斤/米³);
 $N_{зт(зж)}$ ——冰坝(冰塞)中的冰量, m³ (米³);
 N_o ——总的云量;
 N_H ——低云云量;
 N_n ——冰流量;
 n_n ——冰的糙率系数;
 n_{np} ——采用的糙率系数(河槽及冰);
 P ——成冰强度, J/(cm³·s) [焦/(厘米³·秒)];
 Pr ——普兰特里数;
 Q ——水流量, m³/s (米³/秒);
 Q_3 ——冬季水的流量, m³/s (米³/秒);
 q ——地下水的流量比;
 q_n ——冰流量, kg/s (公斤/秒);
 q_{np} ——支流流量, m³/s (米³/秒);
 R ——水力半径, m (米);
 $R_{кp.p}$ ——河床弯曲半径;
 r ——水的反射率;
 r_n ——冰的反射率;

$r_{\text{ли}}$ ——冰花的反射率;
 $r_{\text{сн}}$ ——雪的反射率;
 S ——从水面进入大气的热通量, W/m^2 (瓦/米²);
 $S_{\text{л}}$ ——从冰面进入大气的热通量, W/m^2 (瓦/米²);
 S_{r} ——紊流热交换中的热通量, W/m^2 (瓦/米²);
 $S_{\text{в}}$ ——蒸发热通量, W/m^2 (瓦/米²);
 S'_{p} ——太阳辐射热通量, W/m^2 (瓦/米²);
 S_{p} ——辐射热通量, W/m^2 (瓦/米²);
 $S_{\text{n.p}}$ ——直接太阳辐射热通量; W/m^2 (瓦/米²);
 $S_{\text{p.p}}$ ——散射辐射热通量, W/m^2 (瓦/米²);
 $S_{\text{св}}$ ——有效辐射热通量, W/m^2 (瓦/米²);
 $S_{\text{тр}}$ ——由于水运动的摩擦力而产生的热量, W/m^2 (瓦/米²);
 $S_{\text{д}}$ ——来自河底土壤的热通量, W/m^2 (瓦/米²);
 $S_{\text{о}}$ ——降水的热通量, W/m^2 (瓦/米²);
 $S_{\text{гп.в}}$ ——地下水的通量, W/m^2 (瓦/米²);
 $S_{\text{нп}}$ ——支流的热通量, W/m^2 (瓦/米²);
 T ——绝对温度, $^{\circ}\text{C}$;
 t ——水温, $^{\circ}\text{C}$;
 t_0 ——水面温度, $^{\circ}\text{C}$;
 t_2 ——2米高处的气温, $^{\circ}\text{C}$;
 u ——沉降速度, cm/s (厘米/秒);
 v ——水流速度, m/s (米/秒);
 v_{n} ——表面流速, m/s (米/秒);
 $v_{\text{кп.л}}$ ——冰缘移动速度, m/s (米/秒);
 w_2 ——2米高处的风速, m/s (米/秒);
 w_{10} ——10米高处的风速, m/s (米/秒);
 x ——吹距, m (米);
 x, y, z ——空间坐标, m (米);
 y ——年;

c_a ——水面与大气的热交换系数, $W/(m^2 \cdot K)$ [瓦/(米²·开)];
 α_n ——冰(冰花)覆盖水面的程度;
 α_B ——水的热交换系数, $W/(m^2 \cdot K)$ [瓦/(米²·开)];
 α_{TP} ——阻力系数;
 β ——水膨胀系数;
 δ_n ——冰的孔隙度;
 $\delta_{ш}$ ——冰花的孔隙度;
 δ_{rp} ——土壤的孔隙度;
 $\delta_{3\pi K(\pi T)}$ ——堆冰(冰塞, 冰坝)的孔隙度;
 ε ——长波辐射的相对吸收能力(水为 $\varepsilon = 0.92$);
 η ——紊流热传导率, $W/(m \cdot K)$ [瓦/(米·开)];
 ϑ ——气温当量, $^{\circ}C$;
 λ ——水的热传导率, $W/(m \cdot K)$ [瓦/(米·开)];
 λ_n ——冰的热传导率, $W/(m \cdot K)$ [瓦/(米·开)];
 $\lambda_{ш}$ ——冰花的热传导率, $W/(m \cdot K)$ [瓦/(米·开)];
 $\lambda_{ш.л}$ ——浮冰的热传导率, $W/(m \cdot K)$ [瓦/(米·开)];
 $\lambda_{сн}$ ——雪的热传导率, $W/(m \cdot K)$ [瓦/(米·开)];
 λ_{rp} ——土壤的热传导率, $W/(m \cdot K)$ [瓦/(米·开)];
 μ_{τ} ——内摩擦力系数;
 μ ——动力粘滞度, $Pa \cdot s$ (帕·秒);
 ν ——运动粘滞度, m^2/s (米²/秒);
 ξ ——侧推力系数;
 ρ ——水的密度, kg/m^3 (公斤/米³);
 ρ_n ——冰的密度, kg/m^3 (公斤/米³);
 $\rho_{ш}$ ——冰花密度, kg/m^3 (公斤/米³);
 $\rho_{сн.л}$ ——雪冰密度, kg/m^3 (公斤/米³);
 $\rho_{сн}$ ——雪的密度, kg/m^3 (公斤/米³);
 $\rho_{ш.л}$ ——流冰密度, kg/m^3 (公斤/米³);
 σ ——冰的强度, Pa (帕);

σ_0 ——斯蒂芬-帕茨曼常数，等于 $5.67 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$
[瓦/(米²·开⁴)];

τ ——周期，s (秒);

τ_a ——结冰期，d (日);

τ_b ——解冻期，d (日);

φ ——融冰的相对破坏应力;

φ_m ——流冰花系数;

ω ——横断面面积，m² (米²),

目 录

序言	(1)
主要符号说明	(1)
第一章 冰情研究现状	(1)
1.1. 河流冰情研究现状	(1)
1.2. 水库冰情研究现状	(6)
1.3. 水工建筑物下游冰情研究现状	(9)
第二章 河流结冰	(12)
2.1. 河流结冰过程的理论研究	(12)
2.2. 冰形成过程的特征	(22)
2.3. 河流结冰过程的类型	(39)
2.4. 河流结冰期	(44)
第三章 河流冰塞	(49)
3.1. 冰塞形成过程	(49)
3.2. 冰塞水位	(56)
3.3. 冰塞在苏联河流上的分布	(58)
第四章 河流冰盖	(64)
4.1. 冰盖厚度增长速度	(64)
4.2. 冰盖厚度的空间变化	(75)
4.3. 冰盖的结构	(80)
第五章 河流解冻	(84)
5.1. 河流解冻过程的理论研究	(84)
5.2. 冰盖破坏过程	(88)
5.3. 河流解冻特性	(91)

5.4.	河流解冻过程的类型·····	(100)
5.5.	河流解冻日期·····	(103)
第六章	河流冰坝的形成与分布·····	(107)
6.1.	冰坝形成的条件·····	(107)
6.2.	河流冰坝的分布·····	(116)
第七章	径流调节对河流冰情规律变化的影响·····	(123)
7.1.	水库及其下游冰情特点·····	(123)
7.2.	水库冰盖的形成·····	(125)
7.3.	水库冰盖的破坏·····	(156)
7.4.	水库下游的结冰与解冻·····	(165)
7.5.	调节河段的冰塞和冰坝·····	(171)
第八章	在河川径流区域调水影响下河流的热力和冰情特性变化的评估·····	(197)
8.1.	研究方法·····	(198)
8.2.	西伯利亚河流的热力和冰情特性的可能变化·····	(200)
8.3.	苏联欧洲部分北部河流冰情和热力特性的可能变化·····	(204)
第九章	河流冰情特征的计算方法·····	(212)
9.1.	初冰日期的计算·····	(212)
9.2.	冰花形成速度的计算·····	(215)
9.3.	封冻日期的计算·····	(217)
9.4.	解冻日期的计算·····	(217)
9.5.	冰盖厚度增长速度的计算·····	(218)
9.6.	冰盖厚度的计算·····	(222)
9.7.	冰盖最大厚度的计算·····	(223)
9.8.	冰盖融化速度的计算·····	(224)
9.9.	融化期冰盖强度的计算·····	(230)
9.10.	冷却期和封冻期热通量的计算·····	(232)
9.11.	冰塞特征的计算·····	(239)

9.12. 冰坝特征的计算.....	(244)
9.13. 冰坝和冰塞水位的计算.....	(245)
结 束 语.....	(249)
参考文献.....	(251)

第一章 冰情研究现状

1.1. 河流冰情研究现状

由于水路航运的开发, 以及水电建设和其它经济活动的发展, 很久以来对河流冰情规律的认识引起了学者的注意。

研究河流冰情采用综合研究的方法, 从由站网观测水温和冰情现象开始, 提出进行关于结冰、冰盖的形成和破坏等发展过程的专业工作, 最终找出阐明这些现象的严格理论, 用于制定计算和预报的方法。

从上世纪的 80~90 年代开始, 就组织了常年观测的水位站网对俄国的河流冰情进行系统的研究。在此期间第一次以地图的形式对河流封冻和春季流冰平均开始日期加以地理综合。地图是由 М.А. 雷卡乔夫绘制的[1], 其后又由 В.Б. 肖斯塔科维奇加以订正和补充[2]。随着站网的发展和完善, 使得冰情现象的资料更加准确可靠。在 Е.В. 布里兹尼亚克、Ф.И. 贝京[3]和 В.П. 潘诺夫[4]的著作中, 综合了苏联河流的冬季状况和冰情现象的研究成果。现在, 从站网观测开始至 1975 年的冰情资料已系统地汇编在《基本水文特征值》的附表和《苏联地表水资源》手册的有关冰情章节中。

由 Г. Р. 布列格曼、Н.Ф. 维诺格拉多夫、В.М. 金兹布尔格、Л.К. 达维多夫和 Н.М. 阿留申斯卡娅所完成的研究工作, 对苏联欧洲部分和亚洲部分河流冰情的分析和地理综合作出了重大的贡献, 这些成果都汇总在冰情图集和其它手册中。

在 В. М. 金兹布尔格[5]的研究中, 根据大量新的观测资

料，第一次用计算皮尔逊 III 型曲线方程式参数的方法，提出了建立冰情现象日期和无冰期历时保证率曲线的可能性。用地理综合方程式参数所得出的规律性，能在资料不足的情况下，计算出保证率曲线。

专门讨论研究河流结冰、冰盖的形成和破坏过程的著作很多。在早期研究工作中，水内冰形成特性的探讨占有重要位置，由于在俄国不同气候区的河流上组织了系统的研究，以及许多关于水结晶过程的实验，从而使俄国的科学家能够正确地解释许多难解现象的物理实质。在这方面的研究工作中，В. Я. 阿里特别尔格[6]作出了很大的贡献。他首次指出了在水内冰形成过程中，热交换和水量混合的决定性作用，它们使水分过冷却和结晶时释放热量。

水内冰形成理论的进一步发展，在许多学者的研究和著作中都有所反映。如，В. А. 雷姆沙[7]建立了冰生成强度沿水深的分布与热交换和水量混合的关系；В. Я. 阿里特别尔格、Д. Н. 比比可夫[8]、Л. А. 布基娜[9]、В. В. 比奥德洛维奇[10]、А. Н. 契若夫[11]确定了在水的各种过冷却条件下冰晶增长的形式和速度。在 А. Г. 卡列斯尼柯夫和 В. И. 别里亚耶夫[12]的著作中，完整地论述了解闭合系统方程式基础上所得出的、在冰形成初期水内冰的发生和增长过程。研究在紊流条件下的结晶凝聚和在冻结过程中结晶聚合体的形成的不同方法，引起了学者们的注意[7, 11, 13, 14]。Н. М. 阿布拉缅柯夫[15]在自己的研究中，试图用运动学方程表示细小聚合体的形成过程。

由于采用了 О. 戴维克[16]、Н. Н. 别尔纳斯基 和 В. В. 普洛斯库利亚科夫[17]提出的热量平衡方程式，使水体冷却规律的研究得到了发展。用分析方法计算可以说明水温在时间上和沿河长的变化。在这种情况下用下述两种方法之一进行水温计算：如果水温沿水深变化不大，直接用热量平衡方程式计算（Н. М. 别尔纳斯基、В. В. 普洛斯库利亚科夫、В. А. 雷姆沙、А.

П. 布拉斯拉夫斯基), 或者用热传导方程式计算, 在解方程时, 热量平衡方程式作为边界条件(Л. Н. 比比可夫、А. И. 别霍维奇、Б. В. 普洛斯库利亚科夫、К. И. 洛辛斯基、Л. Г. 舒里亚科夫斯基)。

А. Г. 卡列斯尼柯夫和 А. А. 皮沃瓦洛夫 [18, 19] 对河水的冷却给出了更加严格的解释。通过解方程组, 可以得出计算水温的表达式。这些方程组表示水流与大气、河底土壤, 以及与水本身的相互热作用。但是分析解是很复杂的, 因此, 在实际中没有得到广泛应用 (除非简化方案, 即当进入河槽的热量不大时, 水面与大气的热交换几乎是固定值)。学者们还注意到空气温度为负时水面与空气的热交换。根据苏联河流水面热损失的观测资料, 对 О. 戴维克 [16] 提出的热平衡分量的计算公式进行了多次修改, 从而取得了适合实际计算的更可靠的公式 (С. Н. 克利茨基、М. Ф. 门克里和 К. И. 洛辛斯基 [20], В. А. 雷姆沙和 Р. В. 多钦科 [21])。

В. С. 安东诺夫、Ф. И. 贝京、С. Я. 瓦尔达扎洛夫、Я. Л. 戈特里勃、Р. В. 多钦科、Р. А. 涅日霍夫斯基、К. И. 洛辛斯基、В. А. 雷姆沙、А. Н. 契若夫、Л. Г. 舒里亚科夫斯基等所进行的平原和山区河流结冰过程的研究, 对建立冰情发展与河流水量、冰的冷却和运动情况的关系, 以及对制定结冰和冰盖形成等数量特征的计算方法都起了很大的作用。

在冰情预报实践中, Л. Г. 舒里亚科夫斯基 [22] 的方法得到了广泛的应用, 这个方法是根据水流中热传导和水面与空气热交换条件的分析制定的。结冰期用空气的临界温度与流速的经验关系确定。

水文计算实践中多采用 К. И. 洛辛斯基 [23]、В. А. 雷姆沙 [24]、А. И. 别霍维奇 [25]、А. Н. 契若夫 [26] 等方法, 这些方法考虑了河流结冰期的冰和冰花流量。В. А. 雷姆沙 [13, 27] 利用水内冰形成的特性, 来说明结冰过程的特点。根据

对冰的形成强度沿水深和在水面上分布的研究结果所建立的冰情过程分类, 可以确定结冰的特点和冰期长短。这些工作在 P. B. 多钦科的研究工作中[28]得到了进一步的发展。建立了结冰期的持续时间与从水面进入空气中的热通量密度、水流速度及冰和冰花的物理性质的相关关系, 它们可以用来计算河流的结冰日期[29, 30]。

许多科学家对冬季冰盖的变化进行了研究 [3, 19, 20, 26, 31, 32, 33, 34]。B. B. 比奥德洛维奇用热量平衡方法所作的实验和理论研究, 对研究冰盖厚度增长过程作出了巨大的贡献[10, 35, 36]。

为计算冰的厚度曾提出了十数种经验公式。其中大多数是将冰的厚度与前期负气温之和建立关系。积雪和来自河底的热量对冰厚增长的影响用不同的系数加以考虑[3, 37, 38, 39]。

冰层厚度增长过程的理论研究, 解决了许多实际问题, 这些研究是以较严格的热传导方程式与或多或少带有任意性的一些假设相结合为基础的, 目前冰厚的计算采用的是微分方程的求积方法(К. И. 洛辛斯基[20]、С. В. 鲁特可夫斯基和 А. Г. 卡列斯尼科夫[19]、А. И. 别霍维奇[25]、А. Н. 契若夫[40]、Л. Г. 舒里亚科夫斯基[41]), 或者直接用短时段的微分方程计算(B. B. 比奥德洛维奇[35])。

对于人们所关注的, 而实际上也很重要的解冻过程的研究, 也得到很大的重视。大量的著作专门论述了在热力和机械因素影响下冰盖破坏的研究(B. П. 别尔杰尼科夫[42]、Л. М. 卡恰诺夫、К. Н. 柯尔日温[43]、И. Е. 柯齐茨基[44]、В. А. 科连可夫[45]、Д. Н. 潘费洛夫[46]、B. B. 比奥德洛维奇[35]、И. С. 彼斯恰斯基[47])。在解冻过程的研究中, С. Н. 布拉多夫[48~50]和Л. Г. 舒里亚科夫斯基[51]作出了重大的贡献。在辐射热量和水流能量影响下, 冰盖强度特性变化的理论和实验研究, 是建立冰盖破坏过程模型的基础, 是制定计算和预报解冻